



Rita Simões Silva Henriques

Licenciada em Ciências de Engenharia do Ambiente

Avaliação da implementação da fase III da Zona de Emissões Reduzidas de Lisboa

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia
do Ambiente, Perfil de Engenharia de Sistemas Ambientais

Orientador: Prof. Doutor Francisco Manuel Freire
Cardoso Ferreira, Professor Auxiliar, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Pedro Manuel da Hora Santos Coelho

Arguente: Prof. Doutor Nelson Augusto Cruz de Azevedo Barros

Vogal: Prof. Doutor Francisco Manuel Freire Cardoso Ferreira

Avaliação da implementação da fase III da Zona de Emissões Reduzidas de Lisboa

Copyright © Rita Simões Silva Henriques,
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa,
Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Não podia deixar de expressar os meus sinceros agradecimentos a quem contribuiu, de uma forma ou de outra, para a realização desta dissertação.

Ao Professor Doutor Francisco Ferreira por toda a orientação, apoio e disponibilidade, bem como por todos os conhecimentos transmitidos ao longo desta etapa.

Ao grupo de investigação de qualidade do ar do DCEA, principalmente ao Engenheiro Hugo Tente, por toda a ajuda e paciência. Um agradecimento também à Engenheira Joana Monjardino e à Engenheira Luísa Mendes, pela ajuda disponibilizada.

Aos meus pais, por todo o apoio incondicional. Aos meus irmãos. Ao Bão, pela paciência nestes cinco anos (e por ter vindo para Engenharia do Ambiente, na FCT). Ao João, por tudo. À Rita, à Marta, à Filipa, ao Miguel, ao Sequeira, ao Rui, à Ivone, à Joana, à Joana, ao Cris.

RESUMO

Os efeitos de uma qualidade do ar reduzida são sentidos principalmente em centros urbanos, como Lisboa, onde persistem situações de concentrações elevadas de dióxido de azoto (NO_2) e matéria particulada (PM_{10}), originadas pelo tráfego automóvel. Para diminuir a concentração desses poluentes foi implementada uma Zona de Emissões Reduzidas (ZER) em Lisboa, que entrou na fase III em janeiro de 2015.

Avaliou-se a evolução da qualidade do ar nos últimos cinco anos em Lisboa, nomeadamente as excedências aos valores limite legais de curto prazo para NO_2 e PM_{10} , bem como a influência da meteorologia na sua ocorrência. A qualidade do ar, em geral, melhorou, registando-se a maioria das excedências no outono e inverno, em dias úteis e final da tarde e início da manhã, períodos coincidentes com a maior intensidade de tráfego rodoviário. A altura da base da inversão térmica e a velocidade do vento são mais reduzidas em dias com excedências, o que indicia um papel relevante da meteorologia.

A avaliação do impacto da fase II da ZER nas excedências aos valores limite revelou que o número de excedências e a duração dos episódios de poluição diminuíram, mas mais significativamente em estações fora da ZER.

Analisou-se a influência da fase III da ZER na composição da frota automóvel e nas emissões associadas de NO_x e PM na Avenida da Liberdade, com base nos dados obtidos antes (2014) e depois (2015) da fase III. Verificou-se uma melhoria na frota em toda a cidade, mais acentuada na zona 2 que na zona 1. Concluiu-se que o impacto da fase III foi reduzido, principalmente na zona 1, possivelmente relacionado com a escassa fiscalização. Caso o número de veículos se tivesse mantido igual entre 2014 e 2015, teria sido possível uma redução de 23% nas emissões de NO_x e de 8% nas de PM.

Palavras-chave: Qualidade do ar; ZER; Lisboa; NO_2 ; PM_{10} ; meteorologia.

ABSTRACT

The effects of poor air quality are felt mainly in urban centres, such as Lisbon, where situations of high concentrations of nitrogen dioxide (NO₂) and particulate matter (PM₁₀) originated by road traffic persist. To reduce the concentration of these pollutants, a Low Emission Zone (LEZ) was implemented in Lisbon and it is in phase III since January 2015.

The evolution of air quality over the last five years in Lisbon was assessed, namely the exceedances to short-term legal limit values for NO₂ and PM₁₀ as well as the influence of meteorological factors on their occurrence. In general, air quality has improved and most of the exceedances were registered in autumn and winter, on weekdays and on late afternoon and early morning, periods that are coincident with a period of increasing intensity of road traffic. The inversion layer base height and the wind speed are lower in days with exceedances, suggesting a relevant role of meteorology.

The impact assessment of LEZ's phase II on the exceedances to the limit values revealed that the number of exceedances and the duration of pollution episodes decreased, but more significantly in stations outside the LEZ.

The influence of LEZ's phase III in the composition of the fleet and in the associated emissions of NO_x and PM at Avenida da Liberdade were analyzed, based on data obtained in the period before (2014) and after (2015) phase III. There was an improvement in the fleet throughout the city, sharper on zone 2 than in zone 1. In conclusion, the impact of the phase III has low, particularly in zone 1, possible due to the lack of enforcement. If the number of vehicles had remained the same between 2014 and 2015, it could have been a reduction of 23% in NO_x emissions and 8% in the PM emissions.

Key words: Air quality; LEZ; Lisbon; NO₂; PM₁₀; meteorology.

ÍNDICE

1.	Introdução.....	1
2.	Revisão da literatura.....	3
2.1	Qualidade do ar das zonas urbanas	3
2.2	Principais poluentes atmosféricos	6
2.2.1	Dióxido de Azoto (NO ₂)	6
2.2.2	Partículas (PM ₁₀)	7
2.3	Meteorologia e influência na qualidade do ar.....	9
2.4	Enquadramento legislativo	10
2.4.1	Legislação relativa à qualidade do ar	10
2.4.2	Legislação sobre fontes móveis/veículos	12
2.5	Cálculo de emissões associadas a veículos	14
2.6	Planos e Programas de Melhoria da Qualidade do Ar/Medidas associadas à redução de emissões atmosféricas	14
2.7	Zonas de Emissões Reduzidas	15
3.	Metodologia	19
3.1	Caso de Estudo – Lisboa	19
3.1.1	Qualidade do ar e meteorologia em Lisboa	19
3.1.2	Plano de Melhoria da Qualidade do Ar da Região de Lisboa e Vale do Tejo	22
3.1.3	Implementação da ZER em Lisboa	23
3.2	Estudo da relação entre meteorologia e qualidade do ar	26
3.2.1	Avaliação geral da qualidade do ar em Lisboa	26
3.2.2	Avaliação de excedências	28
3.3	Estudo da influência da ZER na qualidade do ar	30
3.3.1	Avaliação de excedências	31
3.3.2	Avaliação de excedências em comum aos poluentes analisados	32
3.4	Dados de tráfego rodoviário e cálculo de emissões.....	32
4.	Resultados e Discussão	39
4.1	Evolução da qualidade do ar nos últimos cinco anos	39
4.1.1	Evolução das séries temporais	39
4.1.2	Análise da conformidade legal	43
4.1.3	Caracterização detalhada de excedências aos valores limite e avaliação da influência da meteorologia	46
4.1.4	Efeito das excedências de curto prazo nas médias anuais	57
4.2	Avaliação do impacto da ZER na qualidade do ar	60
4.2.1	Caracterização de excedências antes e depois da fase II da ZER	60
4.2.2	Caracterização das excedências em comum aos poluentes NO ₂ e PM ₁₀	67
4.2.3	Análise de episódios relevantes e em comum aos poluentes NO ₂ e PM ₁₀	68

4.3	Avaliação do impacte da ZER em termos de emissões.....	69
4.3.1	Análise da tipologia e tipo de combustível dos veículos	69
4.3.2	Análise de tipologia por norma EURO antes e depois da fase III da ZER.....	72
4.3.3	Emissões de NO ₂ e PM ₁₀ antes e depois da fase III da ZER	77
5.	Conclusões	81
5.1	Principais Conclusões	81
5.2	Limitações do estudo.....	83
5.3	Desenvolvimentos futuros	84
6.	Referências Bibliográficas	85
7.	Anexos.....	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Concentrações de NO ₂ na Europa em 2012 (Fonte: EEA, 2014a)	3
Figura 2.2 - Concentrações de PM ₁₀ na Europa em 2012 (Fonte: EEA, 2014a)	4
Figura 2.3 - Efeitos da poluição do ar na saúde humana tendo em conta o número de pessoas afetadas e a severidade dos efeitos (Fonte: EEA, 2014a).	5
Figura 2.4 - Esquema representativo do enquadramento legislativo da avaliação e gestão da qualidade do ar ambiente na UE e em Portugal (Adaptado de: DCEA-FCT/UNL, 2013).....	11
Figura 3.1 - Localização das estações de monitorização da qualidade do ar consideradas neste estudo (Fonte: Google, 2015).	21
Figura 3.2 - Área abrangida pela fase I da ZER de Lisboa (Fonte: CML, 2015b) e sinalização adotada (Fonte: DCEA-FCT/UNL, 2013).	23
Figura 3.3 - Área abrangida pela fase II da ZER de Lisboa (Adaptado de: CML, 2015c).	24
Figura 3.4 - Sinalização adotada na fase II da ZER (Adaptado de: DCEA-FCT/UNL, 2013).....	25
Figura 3.5 - Sinalização adotada na fase III da ZER (Adaptado de: Deliberação n.º 642/CM/2014).	25
Figura 3.6 - Esquema da metodologia seguida para a avaliação da qualidade do ar nos últimos cinco anos.	27
Figura 3.7 - Esquema da metodologia seguida para a caracterização das excedências aos valores limite de curto prazo nos últimos cinco anos.	29
Figura 3.8 - Esquema da metodologia seguida para a caracterização das excedências aos valores limite de curto prazo, antes e depois da implementação da fase II da ZER.	31
Figura 3.9 - Esquema da metodologia seguida para a caracterização das excedências em comum ao NO ₂ e às PM ₁₀ e para a análise dos maiores episódios em comum, antes e depois da fase II da ZER.	32
Figura 3.10 - Localização dos pontos de amostragem utilizados nos recenseamentos de tráfego (Fonte: Google, 2015).	34
Figura 3.11 - Esquema da metodologia seguida para a análise da frota automóvel antes e depois da fase III da ZER.	35
Figura 3.12 - Esquema da metodologia seguida para cálculo das emissões antes e depois da fase III da ZER.	36
Figura 4.1 - Evolução da concentração média anual de NO ₂ (2010 a 2014).	41
Figura 4.2 - Evolução da concentração média anual de PM ₁₀ (2010 a 2014).	41
Figura 4.3 - Histograma de frequência das concentrações médias horárias de NO ₂ de 2010 a janeiro de 2015 na Avenida da Liberdade.	42
Figura 4.4 – Histograma de frequência das concentrações médias horárias de NO ₂ em 2014 na Avenida da Liberdade.	42

Figura 4.5 – Histograma de frequência das concentrações médias diárias de PM ₁₀ de 2010 a janeiro de 2015 na Avenida da Liberdade.	43
Figura 4.6 - Histograma de frequência das concentrações médias diárias de PM ₁₀ em 2014 na Avenida da Liberdade.	43
Figura 4.7- Número de excedências ao valor limite horário de NO ₂ por ano de 2010 a janeiro de 2015.....	44
Figura 4.8 - Número de excedências ao valor limite diário de PM ₁₀ por ano de 2010 a janeiro de 2015.....	45
Figura 4.9 - Percentagem de excedências ao valor limite horário por mês para o NO ₂ , de 2010 a janeiro de 2015, para todas as estações.	47
Figura 4.10 - Percentagem de excedências ao valor limite horário por dia da semana para o NO ₂ , de 2010 a janeiro de 2015, para todas as estações.	48
Figura 4.11 - Percentagem de excedências ao valor limite horário por hora do dia para o NO ₂ , de 2010 a janeiro de 2015, para todas as estações.	48
Figura 4.12 - Percentagem de excedências ao valor limite diário por mês para as PM ₁₀ , de 2010 a janeiro de 2015, para todas as estações.	49
Figura 4.13 - Percentagem de excedências ao valor limite diário por dia da semana para as PM ₁₀ , de 2010 a janeiro de 2015, para todas as estações.	49
Figura 4.14 - Rosa de ventos de Lisboa (estação Gago Coutinho) para o período de 2010 a janeiro de 2015.....	55
Figura 4.15 - Rosa de poluição para a Avenida da Liberdade referente ao NO ₂ para o período de 2010 a janeiro de 2015 (rumo do vento: estação de Gago Coutinho; concentrações: estação da Avenida da Liberdade).	55
Figura 4.16 - Rosa de poluição para a Avenida da Liberdade referente às PM ₁₀ para o período de 2010 a janeiro de 2015 (rumo do vento: estação de Gago Coutinho; concentrações: estação da Avenida da Liberdade).	56
Figura 4.17 - Rosa de poluição para os Olivais referente ao NO ₂ para o período de 2010 a janeiro de 2015 (rumo do vento: estação de Gago Coutinho; concentrações: estação dos Olivais).....	56
Figura 4.18 - Rosa de poluição para os Olivais referente às PM ₁₀ para o período de 2010 a janeiro de 2015 (rumo do vento: estação de Gago Coutinho; concentrações: estação dos Olivais).....	57
Figura 4.19 - Evolução da concentração média anual de NO ₂ (2010 a 2014), sem as médias horárias superiores a 200 µg/m ³	58
Figura 4.20 - Evolução da concentração média anual de NO ₂ (2010 a 2014), sem os dias em que existiu pelo menos uma média horária superior a 200 µg/m ³	58
Figura 4.21 - Evolução da concentração média anual de PM ₁₀ (2010 a 2014), sem médias horárias superiores a 50 µg/m ³	59

Figura 4.22 - Evolução da concentração média anual de PM ₁₀ (2010 a 2014), sem médias diárias superiores a 50 µg/m ³	59
Figura 4.23 - Comparação da evolução da concentração média anual de NO ₂ (2010 a 2014), sem alterações e retiradas as excedências, para a Avenida da Liberdade.	60
Figura 4.24 - Comparação da evolução da concentração média anual de PM ₁₀ (2010 a 2014), sem alterações e retiradas as excedências, para a Avenida da Liberdade.	60
Figura 4.25 – Percentagem de excedências ao valor limite horário por mês para o NO ₂ , antes e depois da fase II da ZER, para a Avenida da Liberdade.	62
Figura 4.26 - Percentagem de excedências ao valor limite diário por mês para as PM ₁₀ , antes e depois da fase II da ZER, para a Avenida da Liberdade.	66
Figura 4.27 - Distribuição dos veículos por tipologias para a cidade de Lisboa, em 2014 e 2015.....	70
Figura 4.28 - Distribuição dos veículos por tipologias na zona 1 da ZER, em 2014 e 2015.	70
Figura 4.29 - Distribuição dos veículos por tipologias na zona 2 da ZER, em 2014 e 2015.	70
Figura 4.30 - Distribuição dos veículos por tipologias fora da ZER, em 2014 e 2015.....	71
Figura 4.31 - Distribuição dos veículos ligeiros de passageiros por tipo de combustível e cilindrada na cidade de Lisboa, em 2014 e 2015.....	71
Figura 4.32 - Distribuição dos veículos ligeiros de mercadorias por tipo de combustível e cilindrada na cidade de Lisboa, em 2014 e 2015.....	72
Figura 4.33 - Distribuição relativa de cada norma Euro por tipologia de veículos na cidade de Lisboa, em 2014 e 2015.....	72
Figura 4.34 – Distribuição relativa de cada norma Euro por tipologia de veículos na zona 1 da ZER, em 2014 e 2015.	73
Figura 4.35 - Distribuição dos veículos pré-Euro 3 na zona 1 da ZER, em 2014 e 2015.	74
Figura 4.36 - Distribuição dos veículos Euro 3 e posteriores na zona 1 da ZER, em 2014 e 2015.....	74
Figura 4.37 – Distribuição relativa de cada norma Euro por tipologia de veículos na zona 2 da ZER, em 2014 e 2015.	75
Figura 4.38 - Distribuição dos veículos com norma pré-Euro 2 na zona 2 da ZER, em 2014 e 2015.....	75
Figura 4.39 - Distribuição dos veículos com norma Euro 2 ou posterior na zona 2 da ZER, em 2014 e 2015.	76
Figura 4.40 – Distribuição relativa de cada norma Euro por tipologia de veículos fora da ZER, em 2014 e 2015.	77
Figura 4.41 - Distribuição de cada tipologia de veículos nas emissões de NO _x e PM na Avenida da Liberdade, em 2015.	78

Figura 4.42 – Percentagem de emissões reduzidas de NO _x e PM após a implementação da fase III na Avenida da Liberdade e tendo em conta que o número de veículos não se alterou.....	79
Figura 4.43 - Variação de emissões em percentagem de NO _x e PM após a implementação da fase III da ZER na Avenida da Liberdade e tendo em conta o número de veículos e a frota respetivos a cada ano.	80
Figura 7.1 - Peso das normas Euro por tipologia para a Avenida da Liberdade (tendo em conta os locais de amostragem considerados no cálculo das emissões), em 2014 e 2015.	91
Figura 7.2 - Peso dos veículos com norma pré-Euro 3 e peso dos veículos Euro 3 e posterior na Avenida da Liberdade (tendo em conta os locais de amostragem considerados no cálculo de emissões, 2014 e 2015.	91

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1- Valores definidos na legislação nacional para a proteção da saúde humana, para o NO ₂ e para as PM ₁₀ (Fonte: Decreto-Lei n.º 102/2010).....	12
Tabela 2.2 - Datas de introdução das normas Euro por tipo de veículo (Fonte: UE, 2015b).	13
Tabela 2.3 - Emissões por norma Euro para veículos ligeiros (Adaptado de: DieselNet, 2015a).....	13
Tabela 2.4 - Emissões por norma Euro para veículos pesados a gasóleo (Adaptado de: DieselNet, 2015b).....	14
Tabela 2.5 - Características de algumas ZER implementadas na Europa (Adaptado de UE, 2015g; Ellison <i>et al.</i> , 2013).....	16
Tabela 2.6 - Alguns impactes de algumas das ZER implementadas na Europa (Adaptado de: UE, 2015h; Panteliadis <i>et al.</i> , 2014; Cyrus <i>et al.</i> , 2014).	18
Tabela 3.1- Classificação de estações por tipo de emissão dominante (Adaptado de: CCDDR-LVT, 2015c).	20
Tabela 3.2 – Caracterização das estações fixas de monitorização de qualidade do ar utilizadas (Adaptado de: CCDDR-LVT, 2015c).	21
Tabela 3.3 - Locais utilizados para o recenseamento do tráfego e respetiva zona da ZER em que se inserem.	33
Tabela 4.1 - Eficiência anual com base horária para o NO ₂ e para as PM ₁₀ e eficiência anual com base diária para as PM ₁₀ , para todas as estações.	39
Tabela 4.2 – Número de excedências aos valores limite de curto prazo e a menos 10% desses valores para o NO ₂ e PM ₁₀ , por ano.....	46
Tabela 4.3 - Médias das alturas da base da inversão térmica para os últimos cinco anos e para cada ano.....	50
Tabela 4.4 - Resultado da ANOVA a um fator para verificar se a média da altura da base da inversão térmica é diferente para dias com e sem ultrapassagens ao valor limite horário no caso do NO ₂ , na Avenida da Liberdade.	50
Tabela 4.5 - Resultado da ANOVA a um fator para verificar se a média da altura da base da inversão térmica é diferente para dias com e sem ultrapassagens ao valor limite horário no caso do NO ₂ , nos Olivais.	51
Tabela 4.6 - Resultado da ANOVA a um fator para verificar se a média da altura da base da inversão térmica é diferente para dias com e sem ultrapassagens ao valor limite diário no caso das PM ₁₀ , na Avenida da Liberdade.	51
Tabela 4.7 - Resultado da ANOVA a um fator para verificar se a média da altura da base da inversão térmica é diferente para dias com e sem ultrapassagens ao valor limite diário no caso das PM ₁₀ , nos Olivais.	52
Tabela 4.8 - Resultado da ANOVA a um fator para verificar se a média da intensidade do vento é diferente para dias com e sem ultrapassagens ao valor limite horário no caso do NO ₂ , na Avenida da Liberdade.....	53

Tabela 4.9 - Resultado da ANOVA a um fator para verificar se a média da intensidade do vento é diferente para dias com e sem ultrapassagens ao valor limite horário no caso do NO ₂ , nos Olivais.	53
Tabela 4.10 - Resultado da ANOVA a um fator para verificar se a média da intensidade do vento é diferente para dias com e sem ultrapassagens ao valor limite diário no caso das PM ₁₀ , na Avenida da Liberdade.	54
Tabela 4.11 - Resultado da ANOVA a um fator para verificar se a média da intensidade do vento é diferente para dias com e sem ultrapassagens ao valor limite diário no caso das PM ₁₀ , nos Olivais.	54
Tabela 4.12 – Número de excedências ao valor limite antes e depois da fase II da ZER para o NO ₂ e PM ₁₀ e para todas as estações.	61
Tabela 4.13 – Percentagem de excedências ao valor limite horário para o NO ₂ por mês, antes e depois da fase II da ZER, para Avenida da Liberdade e Entrecampos.	62
Tabela 4.14 – Percentagem de excedências ao valor limite horário para o NO ₂ por dia da semana, antes e depois da fase II da ZER, para a Avenida da Liberdade e Entrecampos.	63
Tabela 4.15 – Percentagem de excedências ao valor limite horário para o NO ₂ por hora do dia, antes e depois da fase II da ZER, para a Avenida da Liberdade e Entrecampos.	63
Tabela 4.16 – Número de dias consecutivos em que se registou pelo menos uma excedência ao valor limite horário para o NO ₂ e frequência com que aconteceram, para a Avenida da Liberdade e Entrecampos.	65
Tabela 4.17 - Percentagem de excedências ao valor limite diário para as PM ₁₀ por mês, antes e depois da fase II da ZER, para Avenida da Liberdade, Entrecampos, Olivais, Restelo e Santa Cruz de Benfica.	65
Tabela 4.18 - Percentagem de excedências ao valor limite diário para as PM ₁₀ por dia da semana, antes e depois da fase II da ZER, para a Avenida da Liberdade, Entrecampos, Olivais, Restelo e Santa Cruz de Benfica.	66
Tabela 4.19 - Número de dias consecutivos em que se registaram excedências ao valor limite diário para as PM ₁₀ e frequência com que aconteceram, para todas as estações analisadas. .	67
Tabela 4.20 – Número de dias e percentagens relativas às ultrapassagens em comum entre o NO ₂ e as PM ₁₀ para todas as estações.	68
Tabela 4.21 - Emissões por ano para a Avenida da Liberdade, tendo em conta o mesmo número de veículos e variando a frota automóvel.	78
Tabela 4.22 - Emissões por ano para a Avenida da Liberdade, tendo em conta o número de veículos e a frota automóvel respetivos de cada ano.	79

LISTA DE SIGLAS E ACRÓNIMOS

APA – Agência Portuguesa do Ambiente

CCDR-LVT – Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional de Lisboa e Vale do Tejo

CAFE – *Clean Air for Europe*

CE – Comissão Europeia

CML – Câmara Municipal de Lisboa

DCEA – Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente

EEA – *European Environment Agency*

EMEP – Programa Comum de Vigilância Contínua e de Avaliação do Transporte a Longa Distância dos Poluentes Atmosféricos na Europa

EPA – *Environmental Protection Agency*

FCT/UNL – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

F-FCT/UNL – Fundação da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

INE – Instituto Nacional de Estatística

OAL – Observatório Astronómico de Lisboa

PM – Matéria particulada

PM₁₀ – Partículas inaláveis; partículas de diâmetro aerodinâmico médio inferior a 10 micrómetros (µm)

PMQA-LVT - Plano de Melhoria da Qualidade do Ar da Região de Lisboa e Vale do Tejo

RLVT – Região de Lisboa e Vale do Tejo

UE – União Europeia

UNECE - *United Nations Economic Commission for Europe*

UNINOVA – Instituto de Desenvolvimento de Novas Tecnologias

WHO – *World Health Organization*

ZER – Zona de Emissões Reduzidas

1. INTRODUÇÃO

A poluição do ar é o principal fator de risco ambiental de morte prematura na Europa, tendo sido estimado que mais de 400 000 mortes prematuras em 2012 estariam relacionadas com a má qualidade do ar (EEA, 2014a; WHO, 2014). Apesar das melhorias consideráveis verificadas nas últimas décadas, a Europa ainda está longe de atingir níveis de qualidade do ar que não apresentem riscos para os seres humanos e para o ambiente (EEA, 2014a).

A poluição atmosférica aumenta a incidência de uma grande variedade de doenças (respiratórias, cardiovasculares e cancro) e tem vários impactos a nível ambiental, danificando a vegetação e os ecossistemas. A deterioração da qualidade do ar constitui uma perda substancial para a Europa, a nível dos seus sistemas naturais, da economia, da produtividade da classe trabalhadora e da saúde dos europeus (EEA, 2014a).

Os efeitos resultantes de uma reduzida qualidade do ar têm sido sentidos de forma mais significativa nas zonas urbanas (EEA, 2014a). Nestas zonas, o transporte rodoviário é um grande emissor de matéria particulada (PM) e de óxidos de azoto (NO_x). Foi ainda estimado que a média da contribuição do tráfego urbano e local para as concentrações de partículas inaláveis (PM_{10}) é 35%, enquanto para as concentrações de dióxido de azoto (NO_2) atinge os 64% (EEA, 2013).

Os impactos da poluição atmosférica dependem não só das taxas de emissão de poluentes, mas também da localização e condições das emissões. A meteorologia constitui também um fator importante, uma vez que determina o transporte e a deposição dos poluentes (EEA, 2014a).

Deste modo, torna-se necessário aplicar medidas que atuem ao nível dos transportes nas zonas urbanas, com o objetivo de reduzir as emissões de poluentes. Essas medidas podem ir desde a criação de vias pedestres e cicláveis à aplicação de taxas de congestionamento, passando pela implementação de zonas de emissões reduzidas (EEA, 2014a).

A Região de Lisboa e Vale do Tejo (RLVT) é uma das zonas afetadas por esta problemática. Embora nos últimos anos se tenha verificado uma melhoria significativa da qualidade do ar, ainda persistem algumas situações de concentrações elevadas dos poluentes PM_{10} (partículas inaláveis) e NO_2 (dióxido de azoto), sobretudo em áreas urbanas, nomeadamente na cidade de Lisboa (CCDR-LVT, 2014).

Em 2008, foram fixados os objetivos e parâmetros da qualidade do ar pela nova Diretiva Quadro Europeia da Qualidade do Ar (Diretiva 2008/50/CE) com o fim de reduzir, prevenir e evitar os efeitos nocivos para a saúde humana. A transposição para a legislação nacional foi feita em 2010 com o Decreto-Lei n.º 102/2010 sendo que a necessidade de cumprir os valores limite de concentração de poluentes já tinha dado origem ao Plano e Programa de Execução da Melhoria da Qualidade do Ar para a RLVT.

Neste plano foi proposto, entre várias medidas, a implementação de uma Zona de Emissões Reduzidas (ZER) em Lisboa (CCDR-LVT & DCEA-FCT/UNL, 2009). As ZER são áreas onde os meios de transporte rodoviário mais poluentes são regulamentados, o que significa que veículos com emissões mais elevadas não podem entrar na área da ZER (UE, 2015a). A ZER de Lisboa vai já na sua terceira fase, pelo que é relevante que a sua implementação vá sendo analisada e o seu impacto avaliado.

Esta dissertação teve então três objetivos principais:

- Análise da evolução da qualidade do ar nos últimos cinco anos na cidade de Lisboa e caracterização das excedências aos valores limite legais de curto prazo para NO₂ e PM₁₀, bem como a análise da influência da meteorologia na qualidade do ar observada. Para atingir este objetivo foram analisados os dados dos poluentes NO₂ e PM₁₀, obtidos em cinco estações de monitorização de qualidade do ar localizadas em Lisboa, de 2010 a janeiro de 2015. A caracterização das excedências foi feita com base na altura em que estas ocorreram (dia da semana, mês, estação do ano) e nas condições meteorológicas (altura da base da inversão térmica, velocidade e direção do vento, hora de ocaso do sol) verificadas nesses dias.
- Análise da influência da fase II da ZER na qualidade do ar na cidade de Lisboa. Esta análise foi também efetuada com base nos dados das cinco estações de monitorização para os poluentes NO₂ e PM₁₀, tendo em conta o período antes e depois da fase II ser implementada, de modo a identificar possíveis alterações no comportamento das excedências aos valores limite de curto prazo.
- Análise da influência da fase III da ZER na composição do tráfego automóvel, bem como nas emissões associadas. Foram analisados dados de tráfego automóvel no período antes e depois da fase III ser implementada e estimadas as respetivas emissões de NO_x e PM.

Esta tese encontra-se estruturada em cinco capítulos principais. Após a introdução, o segundo capítulo apresenta a revisão da literatura, onde são descritos os conceitos principais relativos à qualidade do ar, tendo em conta os principais poluentes atmosféricos, a influência da meteorologia na qualidade do ar, a legislação comunitária e nacional, o cálculo de emissões de veículos e as medidas de redução de emissões, principalmente as denominadas Zonas de Emissões Reduzidas.

O terceiro capítulo consiste na descrição da metodologia utilizada e divide-se em quatro partes principais: na primeira parte é feito um enquadramento do caso de estudo, a cidade de Lisboa; em seguida é descrita a metodologia utilizada para a análise da qualidade do ar nos últimos cinco anos e das excedências aos valores limite de curto prazo; em terceiro lugar é explicada a metodologia seguida na análise do impacto da fase II da ZER na qualidade do ar e por fim é descrita a metodologia para análise do impacto da fase III da ZER em termos de tráfego e emissões.

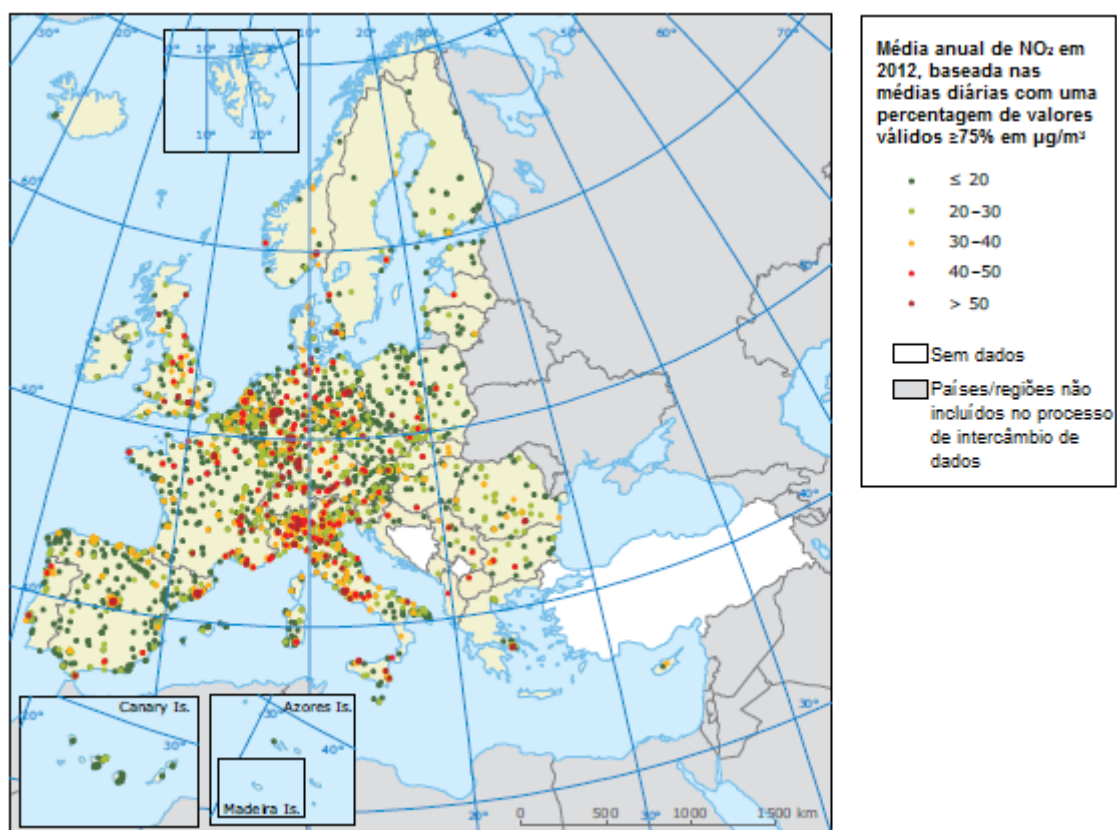
No quarto capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos tendo em conta a metodologia aplicada. Por último, no quinto capítulo constam as conclusões principais, tendo em conta os três objetivos referidos. Neste capítulo são ainda referidas as limitações do trabalho desenvolvido, bem como sugeridos desenvolvimentos futuros do mesmo.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Qualidade do ar das zonas urbanas

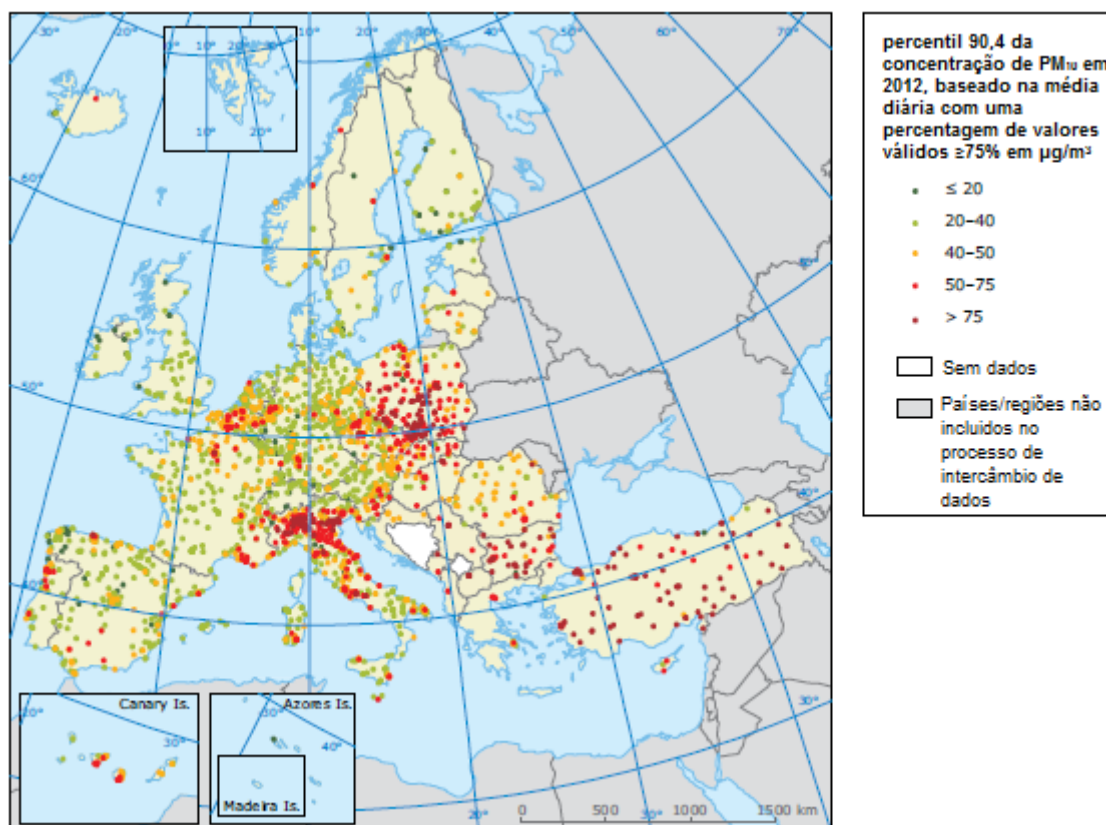
A qualidade do ar é o termo normalmente utilizado para traduzir o grau de poluição no ar que respiramos. Essa poluição é provocada por uma mistura de substâncias químicas, emitidas para o ar ou resultantes de reações químicas, que alteram o que seria a constituição natural da atmosfera (APA, 2015a).

Nas zonas urbanas, a poluição do ar continua a ser um dos problemas mais urgentes (Giannouli *et al.* 2011). Da população urbana da UE-28, 21% vive em zonas onde o valor limite diário da União Europeia (UE) para a concentração de PM₁₀ foi ultrapassado em 2012 e 8% vive em zonas onde o valor limite anual da UE para o NO₂ foi ultrapassado, no mesmo ano (EEA, 2014a). Nas Figuras 2.1 e 2.2 é possível observar as concentrações de NO₂ e PM₁₀, respetivamente, em alguns países europeus.



Nota: Os pontos vermelhos e vermelhos escuros correspondem a excedências do valor limite anual ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Figura 2.1 - Concentrações de NO₂ na Europa em 2012 (Fonte: EEA, 2014a).



Nota: o mapa mostra a proximidade das concentrações de PM_{10} registadas ao valor limite diário, sendo permitidas 35 ultrapassagens, ao longo de um ano, do limite de $50 \mu g/m^3$ – aqui representadas pelo percentil 90,4 dos dados registados ao longo de um ano. Os pontos vermelhos e vermelhos escuros representam as excedências.

Figura 2.2 - Concentrações de PM_{10} na Europa em 2012 (Fonte: EEA, 2014a).

A poluição atmosférica é um importante determinante da saúde, principalmente nos centros urbanos (WHO, 2013). Em 2012, registaram-se 480 000 mortes na Europa relacionadas com a poluição do ar (200 000 em países de baixo e médio rendimento e 280 000 em países de alto rendimento). Neste ano, as doenças cardíacas e acidentes vasculares cerebrais foram as razões mais comuns de morte prematura devido à poluição do ar, sendo responsáveis por 80% dos casos (WHO, 2014). Na Figura 2.3 encontram-se representados os efeitos da poluição do ar na saúde humana e a relação entre o número de pessoas afetadas e a severidade dos efeitos.



Figura 2.3 - Efeitos da poluição do ar na saúde humana tendo em conta o número de pessoas afetadas e a severidade dos efeitos (Fonte: EEA, 2014a).

Além da influência sobre a saúde humana, a poluição do ar também tem vários impactes a nível ambiental, afetando a qualidade da água potável e do solo, bem como os serviços dos ecossistemas. A poluição atmosférica pode ainda danificar materiais e edifícios, incluindo os edifícios culturais mais importantes da Europa. Finalmente, a poluição do ar tem ainda influência sobre o clima, pois alguns poluentes atmosféricos comportam-se como gases de efeito de estufa (GEEs) (EEA, 2014a).

O sector dos transportes é, de longe, a maior fonte de poluição atmosférica nas zonas urbanas. Os veículos a motor são os responsáveis pelas emissões poluentes, sendo que os efeitos na saúde referidos foram relacionados com a proximidade de estradas (WHO, 2013), onde se registam sistematicamente os valores mais elevados de NO₂ e PM₁₀ (Giannouli *et al.* 2011).

As emissões de escape são uma fonte importante de poluição relacionada com o tráfego automóvel, tendo em conta que vários estudos epidemiológicos e toxicológicos relacionaram estas emissões com efeitos adversos na saúde. No entanto, a abrasão das estradas e o desgaste dos pneus e dos travões também são emissões relevantes associadas ao tráfego, ainda mais com as reduções progressivas verificadas nas emissões de escape (Hoek *et al.*, 2013; WHO, 2013).

As emissões de poluentes pelos veículos estão relacionadas com o tipo de veículo, como veículos ligeiros ou pesados. Estão também relacionadas com a idade, condições operacionais e de manutenção, tratamento de gases de escape, tipo e qualidade do combustível, desgaste de peças (como pneus e travões) e ainda com os lubrificantes de motor utilizados (WHO, 2013).

Muitos dos elevados níveis de poluição registados nas zonas urbanas têm sido associados a problemas de poluição localizada em certas vias (*hotspots*), que podem ser classificadas como *street canyons* (Vardoulakis *et al.* 2003; Vardoulakis *et al.* 2007; Giannouli *et al.* 2011). Este termo é frequentemente utilizado para descrever avenidas ladeadas por edifícios de ambos os

lados, que reduzem a ventilação natural nestas vias (Vardoulakis *et al.*, 2003), aprisionando os poluentes atmosféricos e aumentando as concentrações ao nível da rua (Giannouli *et al.* 2011).

Associando a fraca ventilação com as elevadas emissões provenientes do tráfego rodoviário, têm-se verificado excedências das normas legais de qualidade do ar nos *canyons* urbanos (Vardoulakis *et al.* 2007). Deste modo, em locais onde a densidade populacional e o tráfego rodoviário são elevados, é expectável que a exposição humana a poluentes perigosos seja superior em ruas mais estreitas e edificadas (Xie *et al.*, 2005).

2.2 Principais poluentes atmosféricos

Os poluentes atmosféricos podem ser categorizados da seguinte forma:

- a) Poluentes atmosféricos primários – ou seja, os poluentes diretamente emitidos para a atmosfera (por exemplo, do escape de veículos ou chaminés);
- b) Poluentes atmosféricos secundários – os poluentes que são formados na atmosfera (por exemplo, a partir da oxidação e transformação de emissões primárias). Exemplos de poluentes secundários são as PM secundárias e o ozono (O_3), que são formados na atmosfera a partir dos chamados gases precursores (EEA, 2014a).

As fontes de poluentes atmosféricos podem ser de origem antropogénica, como a atividade industrial e os transportes, ou de origem natural, como os fogos florestais, as brisas provenientes do oceano e o transporte de regiões áridas. No caso do transporte automóvel, os principais poluentes são o monóxido de carbono (CO), NO_x - NO_2 e monóxido de azoto (NO) -, hidrocarbonetos e partículas (Vardoulakis *et al.*, 2003). Neste estudo, os poluentes analisados são o NO_2 e as PM_{10} .

2.2.1 Dióxido de Azoto (NO_2)

O NO_2 é um gás reativo, formado principalmente pela oxidação do NO (EEA, 2014a). O NO e o NO_2 são formados principalmente por processos de combustão de alta temperatura, como por exemplo, aqueles que ocorrem nos motores de automóveis e centrais energéticas. Estes dois gases são conhecidos como NO_x , sendo o NO o responsável pela maioria das emissões de NO_x . Uma pequena parte das emissões de NO_x é emitida diretamente como NO_2 , representando entre 5% e 10% na maioria das fontes de combustão. Os veículos a gasóleo são uma exceção, sendo que aproximadamente 70% dos NO_x que emitem é em forma de NO_2 (EEA, 2014a).

Os transportes são o sector que mais NO_x emite, tendo representado 46% do total de emissões destes poluentes no total dos países da UE-28 em 2012 (EEA, 2014a). Relativamente ao NO_2 e ainda no sector dos transportes, a Agência Europeia do Ambiente (*European Environment Agency* – EEA) estima que, em média, a contribuição do tráfego urbano e local para a concentração de NO_2 é de 64% (EEA, 2013). As concentrações mais baixas de NO_2 encontram-se assim em estações rurais e as mais altas em estações de tráfego (EEA, 2014a) e, de um modo geral, perto de estradas (WHO, 2013).

Efeitos na saúde humana

Vários estudos publicados recentemente têm documentado associações entre variações das concentrações de NO_2 no dia-a-dia e variações na mortalidade, internamentos hospitalares e sintomas respiratórios. Para além disso, de acordo com a Organização Mundial de Saúde (*World Health Organisation* – WHO), o número de estudos publicados desde 2004 têm vindo a aumentar, revelando associações entre a exposição a longo prazo ao NO_2 e casos de mortalidade e morbilidade (WHO, 2013).

Segundo a WHO (2013), as associações entre o NO₂ e efeitos na saúde a curto prazo permanecem após o ajuste para outros poluentes. O NO₂ tem alguns efeitos diretos, particularmente a nível respiratório, estando a exposição a este poluente associada a um aumento da mortalidade respiratória e cardiovascular (WHO, 2013; EEA, 2014a). Existem ainda evidências de pequenos efeitos sobre inflamação e aumento da hiper-reatividade das vias aéreas com o NO₂ *per se* na gama de concentração 380-1880 µg/m³ (WHO, 2013).

Nos estudos a longo prazo torna-se muito mais difícil avaliar os efeitos independentes de NO₂ porque, segundo a WHO (2013), nessas investigações as correlações entre as concentrações de NO₂ e outros poluentes são muitas vezes elevadas, de modo que o NO₂ pode representar a mistura de poluentes atmosféricos relacionados com o tráfego automóvel. No entanto, alguns estudos epidemiológicos sugerem associações entre a exposição a longo prazo ao NO₂ com mortalidade respiratória e cardiovascular e com sintomas respiratórios nas crianças (WHO, 2013). Cesaroni *et al.* (2013) verificaram algumas evidências do efeito de NO₂ na mortalidade por doenças respiratórias. Observaram também fortes evidências da associação entre a exposição a longo prazo a NO₂ e doenças cardiovasculares, mortalidade cardiovascular e mortalidade por cancro do pulmão, na população adulta de Roma.

Em Portugal, de acordo com os modelos aplicados por Alves *et al.* (2010), o risco associado a doenças circulatorias aumentou em 0,8%, 0,5% e 2,2% por 10 µg/m³ de aumento nos níveis diários de NO₂ para os grupos etários com idade inferior a 15 anos, idade entre os 15 e os 46 e idade superior a 64 anos, respetivamente. Este estudo sugere assim que as crianças e os idosos são os grupos etários mais suscetíveis à exposição de NO₂.

Efeitos no ambiente

A deposição atmosférica de compostos azotados acidifica os solos e os cursos de água, sendo que a acidificação pode levar a um aumento da mobilização de metais tóxicos aumentando o risco de absorção pela cadeia alimentar. Para além disso, a deposição de compostos azotados pode levar à eutrofização de meios aquáticos, favorecendo uma disponibilização excessiva de nutrientes que pode alterar a diversidade das espécies e levar à invasão de outras novas. O NO₂ atua ainda como um precursor do ozono e das PM. Este poluente pode também provocar direta ou indiretamente danos nos edifícios (EEA, 2014a).

2.2.2 Partículas (PM₁₀)

As partículas são um conjunto complexo de substâncias, minerais ou orgânicas, que se encontram em suspensão na atmosfera, sob a forma líquida ou sólida. Podem ser diretamente emitidas para a atmosfera (partículas primárias) ou podem ser formadas na atmosfera (partículas secundárias). Os principais gases precursores das partículas secundárias são o dióxido de enxofre (SO₂), NO_x, amoníaco (NH₃) e compostos orgânicos voláteis (COV). Os gases SO₂, NO_x e NH₃ reagem na atmosfera formando amónio, compostos de sulfato e compostos de nitrato. Estes compostos formam novas partículas no ar ou condensam a pré-existentes, formando aerossóis inorgânicos secundários (EEA, 2014a).

A dimensão das PM pode variar, sendo as PM₁₀ partículas inaláveis de diâmetro aerodinâmico inferior a 10 micrómetros (µm) (APA, 2015b). As medições de PM₁₀ incluem assim partículas de diâmetro aerodinâmico diferente - partículas grosseiras, finas, e ultrafinas. A distribuição de tamanho está relacionada com a fonte de emissão, com a fração grosseira tendo principalmente origem no solo e em fontes naturais e a fração fina e ultrafina sendo principalmente provenientes de combustão ou de aerossóis secundários (Weinmayr *et al.* 2010).

Nas cidades, as fontes locais de PM mais significativas incluem emissões de escape dos veículos e ressuspensão de poeira da estrada (EEA, 2014a). Fontes importantes não relacionadas com a combustão mas provenientes dos veículos incluem o desgaste dos pneus e travões (WHO, 2013). Estas fontes são emitidas ao nível do solo, conduzindo a impactes significativos nos níveis de concentrações no ambiente (EEA, 2014a). A EEA estimou que a média da contribuição do tráfego urbano e local nas concentrações de PM₁₀ é de 35% (EEA, 2013).

Em Portugal, as concentrações médias diárias de PM₁₀ podem ser influenciadas por fenómenos naturais, tais como o transporte de longa distância de ar proveniente dos desertos do Norte de África (que transporta poeiras em suspensão) e os fogos florestais (Russo *et al.*, 2014; APA, 2015b; CCDR-LVT, 2015a). Episódios de PM₁₀ são frequentemente sentidos em muitas cidades de vários países europeus (como por exemplo, Polónia, Itália, Eslováquia, região das Balcãs e Turquia), incluindo Lisboa e Porto. Estes episódios são mais frequentes no inverno e primavera, como consequência do transporte regional e de longa distância da poluição ou devido a condições atmosféricas altamente estáveis e sem vento (Russo *et al.*, 2014).

Efeitos na saúde humana

As PM₁₀ representam a massa de partículas que entra no trato respiratório (WHO, 2006). Por isso, são também referidas como partículas inaláveis e constituem um dos poluentes atmosféricos mais graves em termos de saúde pública (APA, 2015b), não existindo nenhuma evidência de um nível seguro de exposição ou de um limiar abaixo do qual não ocorram efeitos adversos para a saúde (WHO, 2013).

Apesar da ampla gama de efeitos na saúde, estes verificam-se predominantemente nos sistemas respiratório e cardiovascular (WHO, 2006). As PM₁₀ podem causar ou agravar doenças cardiovasculares e pulmonares, ataques cardíacos e arritmias. Podem ainda causar cancro, aterosclerose, efeitos adversos no nascimento e doenças respiratórias na infância. O resultado pode ser a morte prematura (EEA, 2014a), sendo que a poluição por PM pode reduzir a expectativa média de vida em quase nove meses, em média, na Europa (WHO, 2013).

Toda a população pode ser afetada mas a suscetibilidade pode variar com o estado de saúde ou a idade (WHO, 2006). Segundo o estudo de Andersen *et al.* (2007) sobre a exposição a curto prazo a PM₁₀ e a morbilidade em Copenhaga, um aumento nos níveis de PM₁₀ está relacionado com internamentos hospitalares por doenças cardiovasculares, por doenças respiratórias em idosos e por asma em crianças. Também o estudo de Weinmayr *et al.* (2010) relaciona as PM₁₀ com um agravamento de asma em crianças. Já Pascal *et al.* (2014) observaram uma influência mais forte de PM₁₀ na mortalidade cardiovascular e cardíaca nos idosos, do que noutros grupos mais jovens.

Segundo a WHO (2013), existem fortes evidências de estudos epidemiológicos que associam exposições diárias (média de 24h) a PM tanto com mortalidade como morbilidade, imediatamente e nos dias seguintes. Um desses exemplos é o estudo de Pascal *et al.* 2014, que confirmou o impacto da exposição a curto prazo a PM₁₀ na mortalidade. No entanto, exposições ao longo de vários dias sucessivos podem resultar em efeitos maiores sobre a saúde do que os efeitos relacionados com a exposição em dias isolados (WHO, 2013).

Estudos toxicológicos e clínicos revelaram evidências significativas dos efeitos de partículas derivadas da combustão. Segundo estes estudos, picos de exposição de curta duração (variando entre menos de uma hora e algumas horas) podem levar a alterações fisiológicas imediatas. Um estudo que incluiu PM₁₀ de origem específica (emissões de escape, nitratos secundários e/ou partículas orgânicas, minerais, sulfatos secundários e/ou orgânicos e poeira

da estrada) relacionou de forma significativa a exposição a PM₁₀ com mortalidade cardiovascular (WHO, 2013).

Efeitos no ambiente

As PM₁₀ podem afetar os animais da mesma forma que os humanos e afetam também o crescimento das plantas e os processos nos ecossistemas. Podem ainda provocar danos e sujidade nos edifícios, para além de reduzir a visibilidade (EEA, 2014a).

2.3 Meteorologia e influência na qualidade do ar

A ocorrência de elevadas concentrações de poluentes depende não só da existência de emissões próximas mas também dos processos de diluição, transporte e reação de certos poluentes. Estes processos são fortemente determinados pelas condições meteorológicas que se verifiquem na altura (CCDR-LVT *et al.*, 2006; Russo *et al.*, 2014).

As condições meteorológicas podem facilitar ou agravar a dispersão dos poluentes, o que pode proporcionar situações mais favoráveis ou desfavoráveis em termos de qualidade do ar. Uma série de variáveis podem ser relevantes para caracterizar a poluição do ar, nomeadamente: temperatura, velocidade e direção do vento, humidade relativa, precipitação e altura da camada de mistura (Russo *et al.*, 2014). Condições meteorológicas como a velocidade do vento e inversões térmicas são fatores que afetam fortemente o grau de acumulação dos poluentes atmosféricos perto de fontes emissoras, como o tráfego rodoviário em ambientes urbanos (Grundström *et al.*, 2015).

Vento

Os movimentos do ar são fatores determinantes das concentrações dos poluentes pois os fluxos de ar horizontais (vento) e verticais (turbulência) influenciam a mistura e o transporte dos poluentes atmosféricos (Kim & Guldman, 2011). A velocidade do vento tem uma forte influência nas concentrações dos poluentes atmosféricos, sendo que ventos com baixa intensidade dificultam a dispersão dos poluentes, o que pode dar origem a episódios de poluição (Russo *et al.*, 2014). Já com o aumento da velocidade do vento verifica-se uma diminuição das concentrações de NO₂ (Ghafghazi & Hatzopoulou, 2015; Grundstörn *et al.*, 2015), tendo sido observadas concentrações mais baixas para velocidades de vento superiores a 3 m.s⁻¹ (Grundstörn *et al.*, 2015).

As concentrações de PM₁₀ também diminuem com o aumento da velocidade do vento e são mais elevadas para baixas velocidades, devido à fraca diluição. No entanto, para velocidades de vento superiores a 5 m.s⁻¹ as concentrações de PM₁₀ podem aumentar, o que demonstra a importância da capacidade de ventos fortes associados a uma grande turbulência mecânica para transportar e ressuspender partículas mais grosseiras, como poeiras das estradas e de outras superfícies (Grundstörn *et al.*, 2015). Como os poluentes são principalmente dispersos a favor do vento (a partir da fonte onde são emitidos) a direção do vento também afeta a concentração dos poluentes atmosféricos (Kim & Guldman, 2011).

Altura da camada de mistura/inversão térmica

A camada de mistura é a parte mais baixa da atmosfera onde os constituintes do ar são misturados devido à convecção e turbulência mecânica sobre o solo (Chou *et al.*, 2007), sendo estes processos essenciais para manter a qualidade do ar aceitável perto de fontes emissoras (Wallace, *et al.*, 2010). Como as emissões de poluentes atmosféricos derivadas das atividades antropogénicas são, na sua maioria, provenientes de fontes ao nível do chão, a camada de mistura é normalmente a parte mais poluída da atmosfera, particularmente em áreas urbanas e

industriais (Chou *et al.*, 2007). A altura da camada de mistura define assim a parte superior da camada perto da superfície onde ocorre a mistura dos poluentes (Cimini *et al.*, 2013).

Em áreas urbanas e vales é comum ocorrerem inversões térmicas na camada mais baixa da atmosfera. Considera-se que ocorreu uma inversão térmica quando, em vez de diminuir, se verifica um aumento da temperatura com a altura (Rédon *et al.*, 2014). Este aumento cria condições atmosféricas estáveis, criando uma camada de ar quente que impede o ar junto ao solo de subir e se dispersar, aprisionando os poluentes perto da superfície (Wallace, *et al.*, 2010). Esta camada cria assim situações de estagnação do ar que promovem a ocorrência de episódios de poluição extremos, responsáveis por elevados níveis de poluição (Russo *et al.*, 2014), levando a uma má qualidade do ar (Wallace, *et al.*, 2010).

Deste modo, a profundidade da camada de mistura, referida também como a altura da camada de mistura, ou o limite da inversão térmica, é um dos parâmetros mais críticos em estudos de qualidade do ar (Chou *et al.*, 2007). O estudo de Chou *et al.* (2007) mostrou ainda que as concentrações dos poluentes do ar aumentaram proporcionalmente com a diminuição da altura da camada de mistura, demonstrando que os poluentes atmosféricos ficaram concentrados, quando o topo da camada de mistura foi descendo. Também o estudo de Pandolfi *et al.* (2014) conclui que quanto mais baixa a altura da camada de mistura, mais altas seriam as concentrações dos poluentes.

2.4 Enquadramento legislativo

2.4.1 Legislação relativa à qualidade do ar

A Diretiva Quadro relativa à qualidade do ar, Diretiva 96/62/CE de 27 de setembro de 1996, veio definir os princípios básicos de como a qualidade do ar deve ser avaliada e gerida nos Estados Membros. A Decisão 97/101/CE do Conselho, publicada a 27 de janeiro de 1997, estabeleceu “um intercâmbio recíproco de informações e de dados provenientes das redes e estações individuais que medem a poluição atmosférica nos Estados Membros” (APA, 2015c).

A legislação comunitária atualmente em vigor é a Diretiva 2008/50/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 21 de maio, relativa à qualidade do ar ambiente e a um ar mais limpo na Europa. Esta Diretiva veio agregar num único ato legislativo a Diretiva 96/62/CE, bem como as disposições das três diretivas filhas – Diretiva 1999/30/CE de 22 de abril, Diretiva 2000/69/CE de 16 de novembro e Diretiva 2002/3/CE de 12 de fevereiro – relativas aos poluentes SO₂, NO₂, NO_x, PM₁₀, chumbo (Pb), benzeno (C₆H₆), CO e O₃, e ainda a Decisão 97/101/CE do Conselho (APA, 2015c).

O Decreto-Lei n.º 102/2010 de 23 de setembro transpôs para o direito interno a Diretiva 2008/50/CE, agregando ainda a quarta Diretiva filha – Diretiva 2004/107/CE de 15 de dezembro – relativa ao arsénio, cádmio, mercúrio, níquel e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos no ar ambiente. Este Decreto-Lei “estabelece os objetivos de qualidade do ar tendo em conta as normas, as orientações e os programas da Organização Mundial de Saúde, destinados a preservar a qualidade do ar ambiente quando ela é boa e melhorá-la nos outros casos” (APA, 2015c) e veio revogar os anteriores (Decreto-Lei n.º 276/99, de 23 de julho, Decreto-Lei n.º 111/2002, de 16 de abril, Decreto-Lei n.º 320/2003, de 20 de dezembro, Decreto-Lei n.º 279/2007, de 6 de agosto e Decreto-Lei n.º 351/2007, de 23 de outubro).

Com a Decisão de Execução da Comissão n.º 2011/850/UE, publicada a 12 de dezembro de 2011, relativa às regras respeitantes ao intercâmbio recíproco e à comunicação de informação sobre a qualidade do ar ambiente, foi necessário alterar o Decreto-Lei n.º 102/2010, de 23 de setembro. Esta alteração foi feita pelo Decreto-Lei n.º 43/2015 de 27 de março e refere-se a alterações na definição de «limiar de informação» e a aspetos relativos à qualidade dos dados,

valores limite, níveis críticos e limiares de alerta, planos de qualidade do ar, poluição transfronteiriça, acesso do público à informação, transmissão de informação a nível nacional e transmissão de informação à Comissão Europeia.

Sempre que os objetivos de qualidade do ar definidos não forem atingidos, são tomadas medidas da responsabilidade de diversos agentes em função das suas competências, as quais podem estar integradas em planos de ação de curto prazo ou planos de qualidade do ar, concretizados através de programas de execução (APA, 2015c). A legislação relativa à qualidade do ar encontra-se resumida na Figura 2.4.

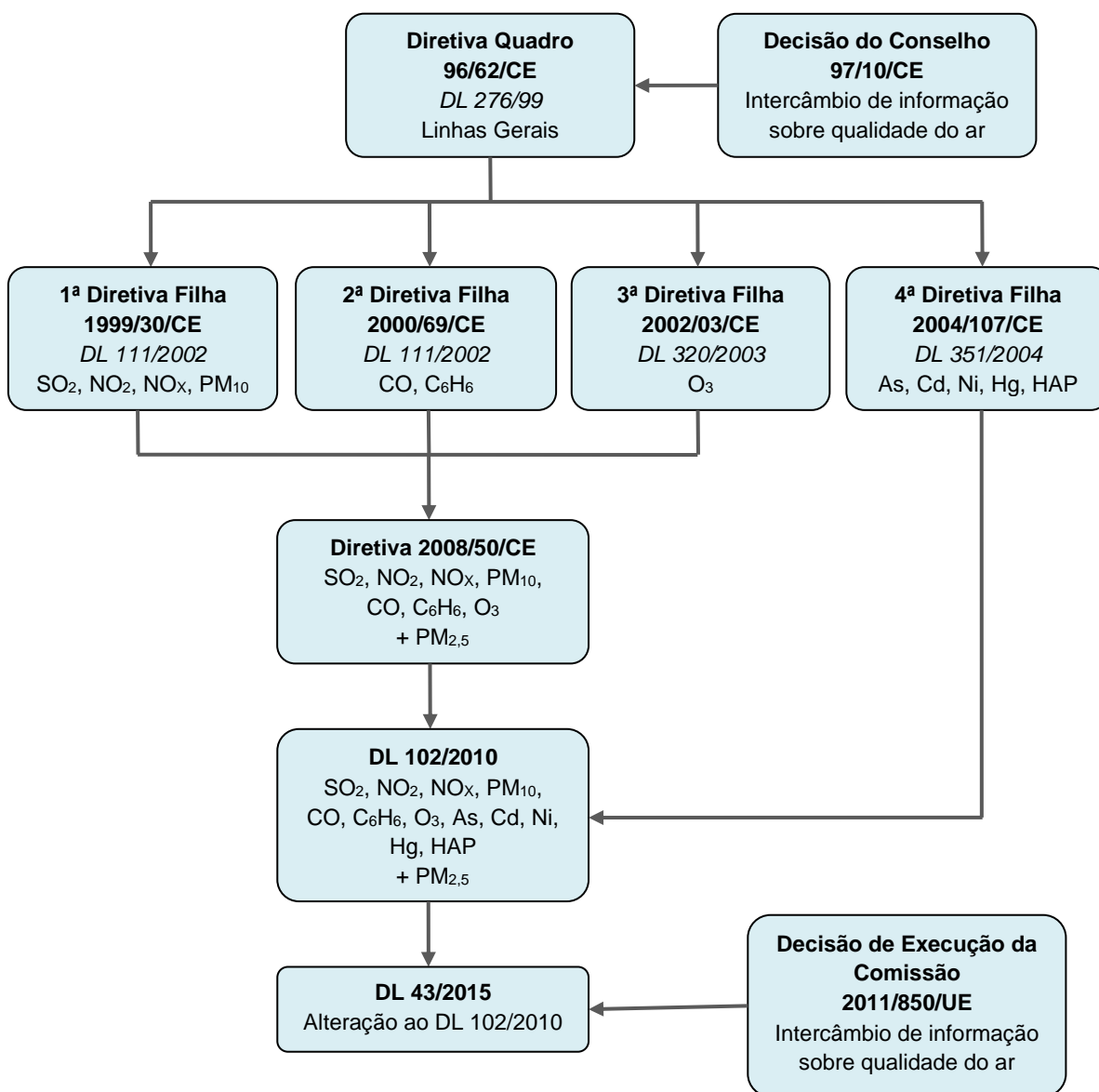


Figura 2.4 - Esquema representativo do enquadramento legislativo da avaliação e gestão da qualidade do ar ambiente na UE e em Portugal (Adaptado de: DCEA-FCT/UNL, 2013).

Na legislação nacional, estão então estabelecidos os valores limite para a proteção da saúde humana, para o NO₂ e para as PM₁₀. Estes valores encontram-se na Tabela 2.1.

Tabela 2.1- Valores definidos na legislação nacional para a proteção da saúde humana, para o NO₂ e para as PM₁₀ (Fonte: Decreto-Lei n.º 102/2010).

Período de Referência	Valor limite	Data em que entrou em vigor
Dióxido de Azoto - NO₂		
Uma hora	200 µg/m ³ , a não exceder mais de 18 vezes por ano civil.	1 de janeiro de 2010
Ano civil	40 µg/m ³	1 de janeiro de 2010
Partículas em suspensão - PM₁₀		
Um dia	50 µg/m ³ , a não exceder mais de 35 vezes por ano civil.	1 de janeiro de 2005
Ano civil	40 µg/m ³	1 de janeiro de 2005

Clean Air for Europe e estratégia temática sobre poluição atmosférica

O programa *Clean Air for Europe* (CAFE) foi criado em 2001 e desenvolveu um conjunto de análises técnicas e políticas que sustentaram o desenvolvimento da estratégia temática sobre poluição atmosférica no âmbito do sexto programa de ação ambiental (CE, 2015a). O objetivo principal desta estratégia, desenvolvida em 2005, consiste em alcançar níveis de qualidade do ar que não resultem em impactos negativos para a saúde humana e para o ambiente até 2020, relativamente à situação em 2000 (EEA, 2014a).

Este objetivo foi reforçado pelo sétimo programa de ação ambiental, a decorrer até 2020. Para o atingir, a legislação europeia sobre qualidade do ar tem seguido uma abordagem de duas vias, com a implementação de normas de qualidade do ar e com regulamentos de mitigação de emissões (EEA, 2014a).

2.4.2 Legislação sobre fontes móveis/veículos

A legislação sobre fontes móveis tem como objetivo melhorar a qualidade do ar na Europa. As emissões poluentes dos veículos a motor são reguladas separadamente por tipologias de veículos. As emissões de veículos ligeiros (de passageiros e comerciais) e de veículos pesados (de mercadorias e de passageiros) começaram por ser reguladas pela Diretiva 70/220/CEE, de 20 de março, para os veículos ligeiros e pela Diretiva 88/77/CE, de 3 de dezembro, para os veículos pesados. Posteriormente foram emitidas uma série de alterações de modo a introduzir limites de emissões mais rigorosos (CE, 2015a).

As normas Euro 3 e Euro 4 para veículos ligeiros foram definidas na Diretiva 98/70/CE, de 13 de outubro (uma das diretivas que altera a Diretiva 70/202/CEE). Na sequência do programa CAFE e da estratégia temática sobre poluição do ar resultante, surgiram as normas Euro 5 e Euro 6, acordadas pelo Parlamento Europeu e pelo Conselho. Estas normas foram baseadas nas participações de *stakeholders* do sector industrial, que foram revistas por um painel de peritos independentes (CE, 2015a) e foram regulamentadas pelo Regulamento n.º 715/2007 (DieselNet, 2015a).

Relativamente aos veículos pesados, a norma Euro III foi definida pela Diretiva 1999/96/CE, de 13 de dezembro, que introduziu também as normas Euro IV e Euro V. No entanto, estas normas foram mais tarde definidas na Diretiva 2005/55/CE, de 28 de setembro, e na Diretiva 2005/78/CE, de 14 de novembro (normas de execução). Também de acordo com o programa CAFE e com a estratégia temática, surgiu a norma Euro VI, com a mesma base de preparação que a norma Euro 6 para os veículos ligeiros (CE, 2015a). A norma Euro VI foi regulada pelo Regulamento n.º 595/2009, com os detalhes técnicos especificados no Regulamento n.º 582/2011 (DieselNet, 2015b).

Assim, a cada quatro a cinco anos uma nova norma Euro assegura que as emissões dos veículos vendidos na Europa vão diminuindo. As datas de aplicação das normas Euro por tipologia de veículo são apresentadas na Tabela 2.2, sendo que todas as datas correspondem a novas homologações. Estes dados fornecem um guia de a que a norma de emissão cada veículo vai pertencer, de acordo com a data em que foi fabricado (UE, 2015b).

Tabela 2.2 - Datas de introdução das normas Euro por tipo de veículo (Fonte: UE, 2015b).

Tipologia dos Veículos	Euro 1	Euro 2	Euro 3	Euro 4	Euro 5	Euro 6
Ligeiros de Passageiros	Julho 1992	Janeiro 1996	Janeiro 2000	Janeiro 2005	Setembro 2009	Setembro 2014
Ligeiros de Mercadorias ≤1305kg	Outubro 1994	Janeiro 1998	Janeiro 2000	Janeiro 2005	Setembro 2010	Setembro 2014
Ligeiros de Mercadorias (os restantes)	Outubro 1994	Janeiro 1998	Janeiro 2001	Janeiro 2006	Setembro 2010	Setembro 2015
Pesados de Mercadorias e Pesados de Passageiros	1992	1995	1999	2005	2008	2013
Motociclos	2000	2004	2007	-	-	-
Ciclomotores	2000	2004	-	-	-	-

Na Tabela 2.3 encontram-se as emissões de poluentes permitidas por cada norma Euro para os veículos ligeiros, a gasóleo e gasolina. As emissões permitidas por cada norma Euro para os veículos pesados a gasóleo encontram-se na Tabela 2.4.

Tabela 2.3 - Emissões por norma Euro para veículos ligeiros (Adaptado de: DieselNet, 2015a).

Norma	Data (Ano/Mês)	CO	HC	HC+NO _x	NO _x	PM
		g/km				
Gasóleo						
Euro 1	1992/07	2,72	-	0,97	-	0,14
Euro 2	1996/01	1,0	-	0,70	-	0,08
Euro 3	2000/01	0,64	-	0,56	0,5	0,05
Euro 4	2005/01	0,50	-	0,30	0,25	0,025
Euro 5	2009/09	0,50	-	0,23	0,18	0,005
Euro 6	2014/09	0,50	-	0,17	0,08	0,005
Gasolina						
Euro 1	1992/07	2,72	-	0,97	-	-
Euro 2	1996/01	2,2	-	0,50	-	-
Euro 3	2000/01	2,3	0,20	-	0,15	-
Euro 4	2005/01	1,0	0,10	-	0,08	-
Euro 5	2009/09	1,0	0,10	-	0,06	0,005
Euro 6	2014/09	1,0	0,10	-	0,06	0,005

Tabela 2.4 - Emissões por norma Euro para veículos pesados a gasóleo (Adaptado de: DieselNet, 2015b).

Norma	Data (Ano/Mês)	CO	HC	NO _x	PM
		g/kWh			
Euro 1	1992, ≤ 85kW	4,5	1,1	8,0	0,612
	1992, > 85kW	4,5	1,1	8,0	0,36
Euro 2	1996/10	4,0	1,1	7,0	0,25
	1998/10	4,0	1,1	7,0	0,15
Euro 3	2000/10	2,1	0,66	5,0	0,10
Euro 4	2005/10	1,5	0,46	3,5	0,02
Euro 5	2008/10	1,5	0,46	2,0	0,02
Euro 6	2013/01	1,5	0,13	0,40	0,01

2.5 Cálculo de emissões associadas a veículos

A metodologia inicial para o cálculo de emissões associadas a fontes móveis surgiu no inventário de emissões CORINAIR, em 1985 (EEA, 2014b). O CORINAIR é um programa que tem como objetivo estabelecer um inventário das emissões de poluentes atmosféricos na Europa. Foi iniciado pela EEA e fez parte dos trabalhos do programa Corine (Coordenação de informação sobre o ambiente) estabelecido pelo Conselho Europeu de Ministros em 1985.

Esta metodologia foi atualizada em 1991, para o inventário CORINAIR de 1990, que deu origem ao primeiro *Emission Inventory Guidebook* (EEA, 2014b). Em 1995, o *European Topic Centre on Air Emissions* (ETC/AEM) continuou o programa CORINAIR. A metodologia utilizada atualmente corresponde à quinta atualização, feita na versão de 2008 (EEA, 2014b).

Posto isto, a orientação técnica para preparar os inventários nacionais de emissões atmosféricas é dada pela metodologia presente no *EMEP/EEA Emission Inventory Guidebook 2013*, atualizado em 2014, que substitui todas as versões anteriores. Este guia apoia a comunicação dos dados relativos às emissões no âmbito da Convenção da Comissão Económica das Nações Unidas para a Europa (*United Nations Economic Commission for Europe* - UNECE) sobre Poluição Atmosférica Transfronteiriça de Longo Alcance (CLRTAP) e da Diretiva da UE relativa aos Tetos Nacionais de Emissões (EEA, 2015).

O Guia é publicado pela EEA com a equipa CLRTAP especializada em Inventários e Projeções de Emissões, responsáveis pelo conteúdo técnico dos capítulos (EEA, 2015). No *EMEP/EEA Emission Inventory Guidebook 2013* consta um capítulo com a metodologia, fatores de emissão e dados de atividade relevantes, que permitem calcular as emissões de escape provenientes do tráfego rodoviário, por tipologia de veículo (EEA, 2014b).

2.6 Planos e Programas de Melhoria da Qualidade do Ar/Medidas associadas à redução de emissões atmosféricas

Desde a década de 1970, que a poluição do ar foi uma das maiores preocupações políticas da Europa. A política da União Europeia sobre qualidade do ar tem como objetivo desenvolver e implementar instrumentos apropriados para melhorar a qualidade do ar. O controlo de emissões de fontes móveis, melhorar a qualidade dos combustíveis e promover e integrar requisitos/restrições de proteção ambiental nos sectores da energia e transportes são formas de alcançar esse objetivo (CE, 2015b).

A legislação europeia sobre qualidade do ar assenta em determinados princípios. O primeiro é que os Estados Membros têm de dividir o seu território em zonas e aglomerações, onde devem fazer avaliações dos níveis de poluição do ar através de medições e modelação e de outras

técnicas empíricas. Nas zonas e aglomerações onde os níveis de poluição forem elevados, os Estados Membros devem elaborar um plano ou programa de qualidade do ar, de modo a assegurar o cumprimento dos valores limite legais. Para além disso, essa informação relativa à qualidade do ar deve ser divulgada à população (CE, 2015b).

Os planos têm como objetivo diminuir as concentrações dos poluentes atmosféricos, até a um nível inferior aos valores limite e valores alvo. De modo a assegurar uma coerência e consistência geral entre diferentes políticas, os planos de qualidade do ar devem ser consistentes com planos e programas concordantes com as diretivas que regulam as emissões de poluentes atmosféricos. Adicionalmente, os planos de qualidade do ar devem incluir medidas específicas com o objetivo de proteger grupos sensíveis da população, como por exemplo as crianças (EEA, 2014a).

A maioria das cidades europeias elaborou Planos de Ação de Qualidade do Ar, para diminuir os níveis de poluição e melhorar a qualidade do ar, em concordância com medidas nacionais, regionais e ao nível da União Europeia. Estes planos dependem também da importância das fontes de emissões poluentes nas cidades e como estas podem ser reduzidas (UE, 2015c).

Posto isto, têm sido aplicadas várias medidas no sector dos transportes em toda a Europa. São exemplos dessas medidas a mudança para modos de geração de energia menos poluentes; dar prioridade ao trânsito urbano mais rápido, a vias pedestres e cicláveis nas cidades bem como ao transporte ferroviário interurbano de carga e transporte de passageiros; mudança para veículos pesados de passageiros a gásóleo menos poluentes e para veículos com menos emissões; portagens, taxas de estacionamento, taxas de congestionamento, limites de velocidade e adição de catalisadores (EEA, 2014a). Estes planos também incluem regularmente a investigação ou a implementação de uma Zona de Emissões Reduzidas (UE, 2015c).

2.7 Zonas de Emissões Reduzidas

As Zonas de Emissões reduzidas (ZER) são áreas onde a entrada dos veículos com maiores emissões de poluentes é restringida. Em algumas ZER, os veículos mais poluentes necessitam de pagar uma taxa se entrarem na área classificada como tal.

A implementação de uma zona de emissões reduzidas é considerada como uma das medidas chave que as cidades podem utilizar para reduzir as emissões provenientes do tráfego rodoviário. Estas zonas têm como objetivo melhorar a qualidade do ar, sendo implementadas em áreas onde os níveis de poluição do ar são perigosos para a saúde (UE, 2015a).

Esta medida já foi implementada em várias cidades europeias e as ZER são conhecidas por vários nomes, consoante o país: *Environment Zones*, *Umweltzonen*, *Milieuzones*, *Lavutslippssone*, *Miljozone*, *Miljözon*, *ZTL ambiente* (UE, 2015a). Todas as ZER afetam os veículos pesados de mercadorias (normalmente com peso bruto superior a 3,5 toneladas) e a maioria afeta pesados de passageiros. Algumas ZER também restringem a circulação de ligeiros de mercadorias, ligeiros de passageiros e motociclos (UE, 2015a).

Relativamente ao período de funcionamento, a maioria das ZER funciona 24 horas por dia, 365 dias por dia, diferindo de país para país (UE, 2015a). Algumas ZER funcionam apenas durante os dias úteis e durante um horário fixo. Existem também esquemas nacionais, como por exemplo na Holanda, onde todas as Zonas de Emissões Reduzidas restringem a circulação de veículos pesados segundo a mesma norma Euro (UE, 2015d). As características de algumas das várias ZER implementadas na Europa encontram-se na Tabela 2.5.

A implementação de ZERs continua a ser uma medida recorrente, pois para além das já existentes, estão previstas outras para várias cidades. Em Antuérpia, na Bélgica, vai ser implementada uma ZER em 2016, com várias fases já previstas com progressivo aumento das restrições (UE, 2015e). Também em Praga, República Checa, vai ser implementada uma ZER em 2016, abrangendo todo o tipo de veículos (UE, 2015f).

Tabela 2.5 - Características de algumas ZER implementadas na Europa (Adaptado de: Ellison *et al.*, 2013; UE, 2015g).

País	Cidade	Data de implementação	Características
Holanda	Amesterdão	Outubro de 2008	<ul style="list-style-type: none"> • Restrições e veículos afetados: <ul style="list-style-type: none"> - Euro 4 para pesados de mercadorias - A partir de 1 de janeiro de 2017: ligeiros de mercadorias têm de cumprir pelo menos Euro 3. - A partir de 1 de janeiro de 2018: táxis e autocarros turísticos têm de cumprir pelo menos Euro 3. • Período funcionamento: Permanente, 365 dias/ano. • Fiscalização: Câmaras.
	Roterdão	2007	<ul style="list-style-type: none"> • Restrições e veículos afetados: <ul style="list-style-type: none"> - Euro 4 para pesados de mercadorias - 1 de janeiro de 2016: aumento da área da ZER; inclui também ligeiros de mercadorias; ligeiros de passageiros a gasóleo têm de cumprir pelo menos Euro 3. - A partir de 1 de janeiro de 2018: ligeiros de passageiros a gasóleo têm de cumprir pelo menos Euro 4; ligeiros de passageiros a gasolina têm de cumprir pelo menos Euro 1. • Período de Funcionamento: Permanente, 365 dias/ano. • Fiscalização: Câmaras de visualização de matrículas.
Reino Unido	Londres	Fevereiro de 2008	<ul style="list-style-type: none"> • Restrições e veículos afetados: <ul style="list-style-type: none"> - Euro 4 para as PM para pesados de mercadorias com mais de 3,5 toneladas e pesados de passageiros com mais de 5 toneladas. - Euro 3 para as PM para veículos de mercadorias até 3,5 toneladas e veículos de transporte de passageiros até 5 toneladas. - A partir de setembro de 2015: Euro 3 para motociclos e ciclomotores, Euro 4 para veículos ligeiros a gasolina e Euro 6 para gasóleo, Euro 6 para veículos pesados. • Período de funcionamento: Permanente, 365 dias/ano. • Fiscalização: Câmaras fixas e móveis com leitura de matrículas.

Tabela 2.5 (cont.) - Características de algumas ZER implementadas na Europa (Adaptado de: Ellison *et al.*, 2013; UE, 2015g).

País	Cidade	Data de implementação	Características
Suécia	Estocolmo	1996	<ul style="list-style-type: none"> • Restrições e veículos afetados: <ul style="list-style-type: none"> - Veículos podem circular até 6 anos desde o registo da primeira matrícula. - Interditos veículos Euro 2. - Veículos Euro 3 podem circular até 2015 (se registados pela primeira vez em 2007). - Veículos Euro 4 podem circular até 2016 (independentemente do ano de registo). - Veículos Euro 5 podem circular até 2020 (independentemente do ano de registo). - Para todos os veículos pesados. • Período de funcionamento: Permanente, 365 dias/ano. • Fiscalização: Manual.
Alemanha	Berlim	Janeiro de 2008	<ul style="list-style-type: none"> • Restrições e veículos afetados: <ul style="list-style-type: none"> - Desde janeiro de 2010: veículos a gasóleo têm de cumprir pelo menos Euro 4 para PM e veículos a gasolina pelo menos a Euro 1. • Período de funcionamento: Permanente, 365 dias/ano. • Fiscalização: Manual, pela polícia. Sistema de autocolantes.
Grécia	Atenas	Setembro de 2012	<ul style="list-style-type: none"> • Restrições e veículos afetados: <p>Dois esquemas: um para o centro da cidade (anel pequeno) e outro para toda a cidade (anel grande).</p> <ul style="list-style-type: none"> - Centro: Veículos até 2,2 toneladas só podem entrar em dias alternados (exceto veículos elétricos ou que cumpram pelo menos a norma Euro 5 (gasolina ou gasóleo) ou Euro 4 (LPG ou gás natural)). - Toda a cidade: Veículos com mais de 2,2 toneladas e autocarros registados depois de 01/01/1990 (para 2013). Todos os anos a data de registo permitido aumenta mais um ano. • Período de funcionamento: Segunda a Sexta, das 7h às 21h. Sexta, das 7h às 15h. Não se aplica em feriados e dias com greves de 24h dos transportes públicos. • Fiscalização: Manual, pela polícia.

Tendo em conta que algumas Zonas de Emissões Reduzidas já estão implementadas há alguns anos, os seus impactes já foram estudados. Na Tabela 2.6 apresenta-se um resumo dos impactes registados de algumas ZER europeias.

No entanto, há que ter em conta que o impacto de uma ZER depende de vários fatores. A forma como é fiscalizada, os veículos afetados, o tamanho da área abrangida, a forma escolhida pelos condutores para cumprir as restrições (por exemplo, se compram um veículo novo, se colocam um filtro ou se compram um veículo em segunda mão que cumpre as

normas), a frota de veículos antes da ZER ser implementada (por exemplo, a idade, quais os tipos de veículos e a percentagem de veículos a gasóleo e a gasolina), a importância das diferentes fontes de poluição e ainda o quão extremos são os problemas de qualidade do ar são exemplos desses fatores (UE, 2015h).

Tabela 2.6 - Alguns impactes de algumas das ZER implementadas na Europa (Adaptado de: Panteliadis *et al.*, 2014; Cyrus *et al.*, 2014; UE, 2015h).

País	Cidade	Impactes ZER
Holanda	Amesterdão	Em 2010: <ul style="list-style-type: none"> • Redução de 4,9% na concentração de NO₂; • Redução de 5,9% na concentração de NO_x; • Redução de 5,8% na concentração de PM₁₀ (Panteliadis <i>et al.</i>, 2014).
Reino Unido	Londres	<ul style="list-style-type: none"> • Redução de 2,4% nas emissões de NO_x; • Redução de 1,9% nas emissões de PM₁₀; • Redução de 0,12 µg/m³ nas concentrações médias de NO₂; • Redução de 0,03 µg/m³ nas concentrações médias de PM₁₀ (UE, 2015h).
Alemanha	Berlim	Em 2010, face à tendência para 2010 sem ZER: <ul style="list-style-type: none"> • Redução de 20% nas emissões de NO_x; • Redução de 58% nas emissões de partículas provenientes da combustão de gasóleo; Redução nas excedências de PM ₁₀ de 28 para 24 por ano; Redução de 3% na concentração de PM ₁₀ (UE, 2015h). Em 2012, face a um cenário sem alterações: <ul style="list-style-type: none"> • Redução de 63% nas emissões de partículas de gasóleo (Cyrus <i>et al.</i>, 2014).
Suécia	Estocolmo	Em 2000: <ul style="list-style-type: none"> • Redução de 10% nas emissões de NO_x; • Redução de 40% nas emissões de PM₁₀. • Redução das concentrações de PM_{0,2} entre 0,5% a 9% (se a ZER tivesse sido cumprida por todos os veículos essa redução seria entre 0,5% a 12%) (UE, 2015h).

Os impactes de uma ZER podem ser medidos de diferentes formas. Por exemplo, num estudo realizado em cinco cidades Holandesas, a metodologia utilizada foi a seguinte: compararam ruas principais e localizações suburbanas (não afetadas pela ZER) para distinguir as tendências nas concentrações atribuídas à ZER das atribuídas a outros fatores como a redução genérica de emissões, a crise económica desde 2008 e as condições meteorológicas. Foram também realizadas contagens com classificação de veículos motorizados, feitas manualmente durante 30 minutos em horas de tráfego calmo (pelo menos duas vezes por período) (Boogaard *et al.*, 2012).

3. METODOLOGIA

A qualidade do ar na cidade de Lisboa continua a ser um fator de preocupação, tendo em conta os níveis de poluição registados nos últimos anos. No sentido de promover a sua melhoria, têm sido aplicadas medidas com o objetivo de reduzir as elevadas concentrações de alguns poluentes, sendo a Zona de Emissões Reduzidas de Lisboa uma dessas medidas.

Esta dissertação incide principalmente na avaliação do impacto da ZER de Lisboa através da metodologia apresentada neste capítulo. Inicialmente é feito um enquadramento e caracterização da cidade de Lisboa como caso de estudo e a natureza da respetiva Zona de Emissões Reduzidas.

O trabalho, incluindo a metodologia, foi dividido em três partes principais:

- A avaliação da qualidade do ar nos últimos cinco anos, bem como a caracterização das excedências aos valores limite legais de curto prazo dos poluentes NO_2 e PM_{10} e respetiva influência da meteorologia;
- A análise da influência da fase II da ZER na qualidade do ar na cidade de Lisboa;
- A análise da influência da fase III da ZER na composição do tráfego automóvel e nas emissões associadas.

3.1 Caso de Estudo – Lisboa

3.1.1 Qualidade do ar e meteorologia em Lisboa

No período de 2001 a 2013, as concentrações dos poluentes PM_{10} , NO_2 , O_3 e SO_2 , registadas nas estações da Rede de Monitorização da Qualidade do Ar (RMQA) gerida pela CCDR-LVT, evidenciaram problemas de conformidade com os valores regulamentares definidos na legislação em vigor para a proteção da saúde humana (CCDR-LVT, 2015b). Devido a estes incumprimentos, foram instaurados dois processos por infração junto do Tribunal Europeu de Justiça em relação à atuação do Estado Português nesta matéria, em particular no que diz respeito às excedências aos valores limite para NO_2 e PM_{10} (DCEA-FCT/UNL, 2015).

Na Região de Lisboa e Vale do Tejo (RLVT) o NO_2 e as PM_{10} têm como principal origem as emissões do tráfego rodoviário (CCDR-LVT, 2015b). Tendo em conta que, em Lisboa, 48% dos movimentos pendulares são feitos com recurso ao automóvel (INE, 2011), é nesta zona da RLVT que se verificam as concentrações de NO_2 e PM_{10} mais elevadas (CCDR-LVT, 2015b).

Estações de monitorização

Considerando os fatores acima mencionados, é necessário acompanhar em detalhe a evolução da qualidade do ar na cidade de Lisboa, nomeadamente em relação aos poluentes NO_2 e PM_{10} . Nesta zona a qualidade do ar é avaliada com base nas medições efetuadas nas estações da RMQA da CCDR-LVT (CCDR-LVT, 2015b).

As estações estão equipadas com um conjunto de analisadores que medem em contínuo e de forma automática vários poluentes atmosféricos. Este equipamento tem a capacidade de produzir dados em “tempo real”, sendo que o ar amostrado é conduzido a analisadores onde são determinadas as concentrações de cada poluente com base nas características óticas ou nas propriedades físicas dos poluentes. No caso dos NO_x (incluindo NO_2) essa determinação é feita por quimiluminescência (em todas as estações) e no caso das PM_{10} é feita por atenuação da radiação β (Avenida da Liberdade, Entrecampos e Olivais) e por micro-balança oscilante e elemento cónico (TEOM) (Restelo e Santa Cruz de Benfica) (CCDR-LVT, 2015c).

Estes dados são enviados hora a hora, através da rede de banda larga móvel (GPRS), para um servidor localizado na CCDR-LVT que centraliza, numa base de dados relacional, toda a informação das estações. A informação recolhida é sujeita a uma validação automática sendo novamente validada por um operador da RMQA. Os dados são disponibilizados na base de dados nacional sobre qualidade do ar (QualAr - <http://qualar.apambiente.pt/>), sob a forma de concentrações médias horárias e de um índice de qualidade do ar para as diversas zonas da RLVT (CCDR-LVT, 2015c).

As estações estão instaladas em diferentes tipos de zonas (rurais, suburbanas e urbanas) e apresentam tipologias distintas, dependentes das emissões dos poluentes dominantes nas zonas onde se encontram instaladas. As estações urbanas e suburbanas, localizadas nas aglomerações da RLVT, são classificadas como se vê na Tabela 3.1.

Tabela 3.1- Classificação de estações por tipo de emissão dominante (Adaptado de: CCDR-LVT, 2015c).

Classificação	Descrição
Tráfego	<ul style="list-style-type: none"> • Situam-se na proximidade de vias de tráfego intenso. • Permitem avaliar o risco máximo da exposição da população às emissões do tráfego automóvel.
Fundo	<ul style="list-style-type: none"> • Não se encontram sob a influência direta de vias de tráfego ou de qualquer fonte próxima de poluição. • Permitem conhecer a exposição média da população aos fenómenos de poluição de fundo.
Industriais	<ul style="list-style-type: none"> • Situam-se na proximidade de zonas industriais. • Permitem conhecer as concentrações máximas de certos poluentes de origem industrial aos quais a população pode estar pontualmente exposta.

A RMQA da CCDR-LVT é atualmente constituída por 24 estações. Nesta dissertação foram utilizados os dados de cinco estações da zona da Área Metropolitana de Lisboa Norte: três de tráfego e duas de fundo (como estações de controlo). As estações utilizadas e respetivas características encontram-se na Tabela 3.2 e a sua localização na Figura 3.1 (a vermelho encontram-se as estações de fundo e a azul as de tráfego).

Tabela 3.2 – Caracterização das estações fixas de monitorização de qualidade do ar utilizadas (Adaptado de: CCDR-LVT, 2015c).

Estação	Tipo de Ambiente	Tipo de Influência	Data início de funcionamento	Características do local	Poluentes Medidos
Avenida da Liberdade	Urbana	Tráfego	Janeiro de 1994	Tráfego intenso. Um dos principais eixos da cidade, com 10 faixas de rodagem.	NO, NO ₂ , NO _x , CO, PM ₁₀ .
Entrecampos	Urbana	Tráfego	Março de 1992	Zona de tráfego intenso. Junto ao eixo Campo Grande – Av. da República com o eixo da Av. das Forças Armadas-Av. EUA.	NO, NO ₂ , NO _x , CO, SO ₂ , PM ₁₀ , PM _{2,5} , C ₆ H ₆ .
Olivais	Urbana	Fundo	Março de 1992	Zona residencial de Olivais Norte na proximidade de vias de tráfego intenso.	NO, NO ₂ , NO _x , CO, O ₃ , SO ₂ , PM ₁₀ , PM _{2,5} .
Restelo	Urbana	Fundo	Fevereiro de 2002	Zona residencial com volume de tráfego reduzido, na proximidade de vias de tráfego intenso.	NO, NO ₂ , NO _x , O ₃ , PM ₁₀ .
Santa Cruz de Benfica	Urbana	Tráfego	Dezembro de 2008	Zona residencial, próxima da Estrada de Benfica.	NO, NO ₂ , NO _x , CO, PM ₁₀ .

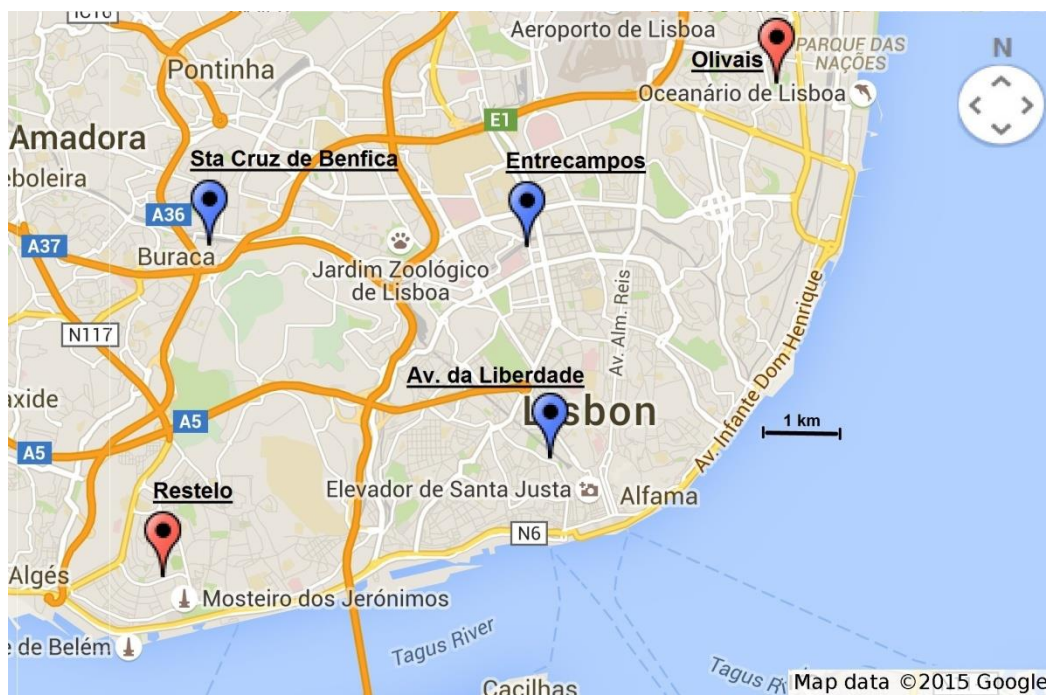


Figura 3.1 - Localização das estações de monitorização da qualidade do ar consideradas neste estudo (Fonte: Google, 2015).

Meteorologia

Na avaliação da qualidade do ar, para além da identificação das emissões que originam as elevadas concentrações dos poluentes em estudo, é fundamental o conhecimento das condições meteorológicas que condicionam os valores obtidos (CCDR-LVT *et al.*, 2006). Existem determinadas condições meteorológicas que podem facilitar ou agravar a dispersão dos poluentes e assim proporcionar situações mais favoráveis ou desfavoráveis em termos de qualidade do ar. Vento fraco e inversões térmicas podem ser fatores que conduzem a concentrações muito elevadas de alguns poluentes (CCDR-LVT *et al.*, 2006).

Deste modo, torna-se relevante analisar se na RLVT as elevadas concentrações de alguns poluentes são função das condições meteorológicas associadas. Desta forma pode-se avaliar se o agravamento da qualidade do ar pode justificar a tomada de medidas adicionais para reduzir as emissões atmosféricas, com o objetivo de não aumentar a média anual ou o número de excedências de valores limite diários de poluentes, se for este o caso (CCDR-LVT *et al.*, 2006).

Lisboa está localizada a norte do estuário do rio Tejo, na costa do Oceano Atlântico e é constituída por sete colinas. A direção do vento no inverno é maioritariamente Sudoeste, Oeste e Noroeste mas, a partir de março, há um grande aumento na frequência de ventos do quadrante Norte. Tendo em conta o regime de ventos e o impacto do oceano que diminui os efeitos dos aerossóis e poluição, seria de esperar que os níveis de poluentes em Lisboa não fossem demasiado elevados (Alves *et al.*, 2010, Russo *et al.* 2014). No entanto, em condições meteorológicas adversas, de baixa dispersão dos poluentes e inversões térmicas, principalmente no inverno, podem verificar-se altas concentrações de poluentes atmosféricos (Alves *et al.*, 2010).

A estação meteorológica de onde provêm os dados de vento utilizados nesta dissertação é a estação Gago Coutinho (Aeroporto), em Lisboa. Trata-se de uma estação do tipo sinóptica, onde as medições tiveram início a 1 de janeiro de 1982 (IPMA, 2015a). Os dados da altura da base da inversão térmica provêm de sondagens cujos resultados são disponibilizados no *website* da *University of Wyoming* (University of Wyoming, 2015).

3.1.2 Plano de Melhoria da Qualidade do Ar da Região de Lisboa e Vale do Tejo

O Decreto-Lei n.º 279/2007, de 6 de agosto, estipulou que, para as zonas onde os níveis de poluentes são superiores ao valor limite, devem ser elaborados planos de qualidade do ar e adotadas medidas com o objetivo de fazer cumprir esses valores (CCDR-LVT & DCEA-FCT/UNL, 2009). Na sequência do referido Decreto-Lei e da qualidade do ar verificada na região de Lisboa, a CCDR-LVT elaborou o Plano de Melhoria da Qualidade do Ar da Região de Lisboa e Vale do Tejo (PMQA-LVT), aplicável à aglomeração da Área Metropolitana de Lisboa Norte, onde se registaram níveis dos poluentes NO₂ e PM₁₀ superiores aos valores limite.

O PMQA-LVT foi aprovado pela Portaria n.º 715/2008, de 6 de agosto, dando resultado ao Programa de Execução do respetivo plano, elaborado pela CCDR-LVT em 2009. Para além do diagnóstico e caracterização da qualidade do ar ambiente na RLVT requerida neste Programa de Execução, foi feita a identificação e avaliação de um conjunto de Políticas e Medidas (P&M) (CCDR-LVT & DCEA-FCT/UNL, 2009).

Nas P&M, a ênfase foi dada ao sector dos transportes, principalmente às medidas destinadas à redução de emissões do tráfego rodoviário, fonte principal das emissões de NO₂ e PM₁₀ na região em questão. Algumas dessas políticas e medidas foram ainda classificadas como supramunicipais, por envolverem um conjunto de entidades que ultrapassava a fronteira de um só município (CCDR-LVT & DCEA-FCT/UNL, 2009).

Dessas P&M fez parte a “Criação de uma Zona de Emissões Reduzidas na cidade de Lisboa”. Para o seu desenvolvimento, foi estabelecido um grupo de trabalho sectorial com as seguintes entidades: Autoridade Nacional de Segurança Rodoviária, CCDR-LVT, DCEA-FCT/UNL, CML, Instituto de Mobilidade e dos Transportes Terrestres (IMTT) e o Gabinete do Secretário de Estado do Ambiente (CCDR-LVT & DCEA-FCT/UNL, 2009).

3.1.3 Implementação da ZER em Lisboa

A implementação da ZER de Lisboa, da responsabilidade da CML, foi feita de forma faseada, tendo em conta a área geográfica afetada, a tipologia dos veículos abrangidos e o seu desempenho ambiental com base nas normas Euro. A ZER já passou pela fase I, fase II e está atualmente na sua terceira fase (fase III).

A fiscalização na ZER é feita de forma manual, pela Polícia Municipal, estando prevista também a intervenção da Polícia de Segurança Pública. Após uma primeira triagem pela data de matrícula, é verificado o Documento Único Automóvel (DCEA-FCT/UNL, 2013).

Fase I

A primeira fase da ZER entrou em vigor no dia 4 de julho de 2011, restringindo a circulação dos veículos que não respeitassem pelo menos a norma de emissão Euro 1 (ou seja, foram proibidos os veículos construídos antes de julho de 1992) (CML, 2015a). A zona abrangida pela fase I da ZER (Figura 3.2) consistia no eixo da Avenida da Liberdade, limitado a norte pela Rua Alexandre Herculano e a sul pela Praça do Comércio (com atravessamentos permitidos entre a Rua das Pretas e a Praça da Alegria e na Rua da Conceição) (DCEA-FCT/UNL, 2013).

A restrição era aplicada nos dias úteis, das 8h às 20h, e a todas as tipologias de veículos, exceto motociclos. Para além disso eram excecionados veículos de residentes na cidade, veículos de emergência, veículos especiais e de pessoas com mobilidade reduzida, táxis, veículos clássicos (devidamente certificados) e transportes coletivos (DCEA-FCT/UNL, 2013; CML, 2015b). A sinalização adotada nesta fase também se encontra na Figura 3.2.



Figura 3.2 - Área abrangida pela fase I da ZER de Lisboa (Fonte: CML, 2015b) e sinalização adotada (Fonte: DCEA-FCT/UNL, 2013).

Fase II

A fase II da ZER teve início a 1 de abril de 2012 e caracterizou-se pelo alargamento da área abrangida (DCEA-FCT/UNL, 2013). A ZER passou assim a estar dividida em duas zonas (Figura 3.3).

A zona 1 corresponde à área abrangida pela fase I (eixo da Avenida da Liberdade) enquanto a zona 2 engloba uma maior área da cidade de Lisboa e é limitada pela Av. Ceuta, Eixo Norte-Sul, Av. Forças Armadas, Av. EUA, Av. Marechal António Spínola, Av. Santo Condestável e Av. Infante D. Henrique (DCEA-FCT/UNL, 2013). Na zona 1 restringiu-se a circulação a veículos que não cumprissem pelo menos a norma Euro 2 (veículos construídos após 1996) e na zona 2 restringiu-se a veículos que não cumprissem pelo menos a norma Euro 1 de emissões (DCEA-FCT/UNL, 2013).

O período de funcionamento também foi alargado, passando a ZER a vigorar entre as 7h e as 21h, mas mantendo-se apenas nos dias úteis. Relativamente às exceções, a única diferença passou pela isenção dos residentes na zona 1, que passou a aplicar-se apenas aos residentes dentro desta área e não a residentes em qualquer zona da cidade (DCEA-FCT/UNL, 2013). A sinalização também foi adaptada a esta segunda fase, como se vê na Figura 3.4.

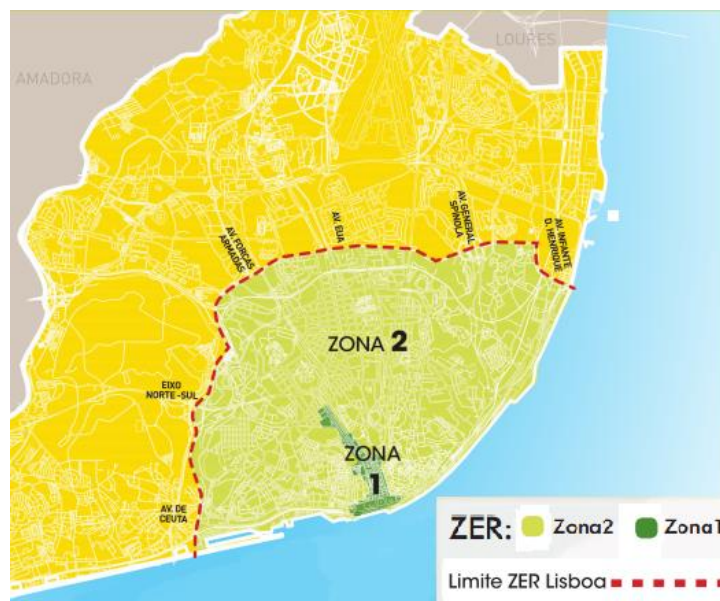


Figura 3.3 - Área abrangida pela fase II da ZER de Lisboa (Adaptado de: CML, 2015c).

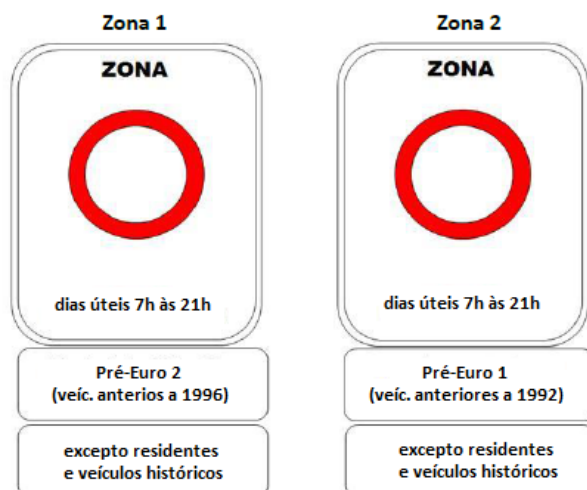


Figura 3.4 - Sinalização adotada na fase II da ZER (Adaptado de: DCEA-FCT/UNL, 2013).

Fase III

A fase III da ZER entrou em vigor a 15 de janeiro de 2015, mantendo-se até à data. A área abrangida continuou a mesma, dividida entre a zona 1 e zona 2, bem como o período de funcionamento (CML, 2015a). A alteração ocorreu apenas ao nível das restrições aplicadas, passando a ser proibida a circulação de veículos que não cumpram pelo menos a norma Euro 3 (ou seja, veículos construídos após 2000) na zona 1 e pelo menos a norma Euro 2 na zona 2. A sinalização foi alterada consoante as novas restrições da fase III, como se pode verificar na Figura 3.5.



Figura 3.5 - Sinalização adotada na fase III da ZER (Adaptado de: Deliberação n.º 642/CM/2014).

Tanto na fase I como na fase II, os veículos ligeiros de passageiros afetos à atividade de transporte em táxi não tinham de cumprir as restrições impostas pela ZER. Na fase III, segundo a Deliberação n.º 642/CM/2014 da CML, os táxis saíram de um regime de exceção para um regime em que são obrigados a cumprir a ZER, de uma forma faseada.

A primeira fase, em que os táxis têm de cumprir pelo menos a norma Euro 1 na zona 1 e zona 2, entrou em vigor dia 1 de julho de 2015. A segunda fase está prevista para dia 1 de julho de 2016 e vai impedir os táxis que não respeitem pelo menos a norma Euro 2 de circular na zona

1 da ZER de Lisboa. Está ainda prevista uma terceira fase, a entrar em vigor a 1 de julho de 2017, que vai restringir a circulação de táxis que não cumpram pelo menos a norma Euro 3 na zona 1 e a norma Euro 2 na zona 2. Tendo em conta o curto período de tempo em que as restrições aplicadas aos táxis estão em vigor, esta medida não vai ser considerada para a análise feita.

3.2 Estudo da relação entre meteorologia e qualidade do ar

O objetivo neste subcapítulo é apresentar a metodologia utilizada para a avaliação da qualidade do ar nos últimos cinco anos, bem como para a caracterização das ultrapassagens aos valores limite de curto prazo (horário para o NO_2 e diário para as PM_{10}) e avaliação da influência da meteorologia nessas ultrapassagens. É ainda descrita a metodologia utilizada para avaliar a influência das excedências aos valores limite de curto prazo nas médias anuais de cada poluente estudado.

Esta dissertação teve início em fevereiro de 2015, depois da entrada em vigor da fase III da ZER de Lisboa, em janeiro do mesmo ano. Deste modo, todos os dados de qualidade do ar e meteorologia analisados neste subcapítulo correspondem ao período que vai desde o ano de 2010 a janeiro de 2015. Foi escolhido este período, pois, de acordo com o disposto no Decreto-Lei n.º 102/2010, os regimes de avaliação da qualidade do ar ambiente para os poluentes NO_2 e PM_{10} são estabelecidos com base nos últimos cinco anos. Todos os dados foram obtidos na base de dados QualAr (APA, 2015d) e estão validados pela CCDD-LVT, exceto os relativos a 2014 e janeiro de 2015.

3.2.1 Avaliação geral da qualidade do ar em Lisboa

A avaliação geral da qualidade do ar em Lisboa nos últimos cinco anos teve como objetivo perceber a evolução dos poluentes NO_2 e PM_{10} ao longo deste período. A metodologia utilizada encontra-se resumida na Figura 3.6.

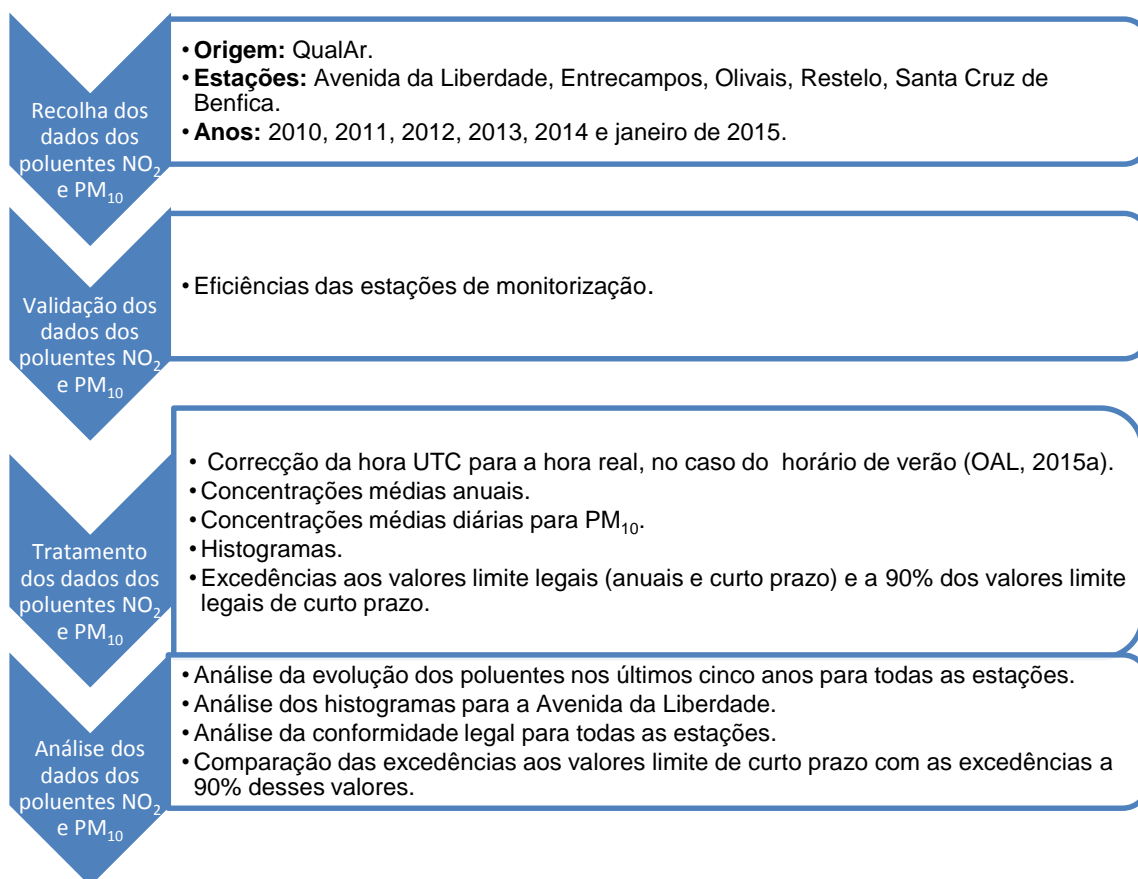


Figura 3.6 - Esquema da metodologia seguida para a avaliação da qualidade do ar nos últimos cinco anos.

Em primeiro lugar foi avaliada a eficiência anual de cada estação fixa de monitorização, dado que é necessário atingir uma certa proporção de dados válidos para tratamento estatístico, de acordo com o Decreto-Lei n.º 102/2010, de 23 de setembro. Para o NO₂ foi calculada a eficiência anual com base horária, tendo em conta que o respetivo valor limite é horário.

Para as PM₁₀ foi também calculada a eficiência com base horária e ainda com base diária, tendo também em conta o valor limite ser relativo à média diária. No cálculo da eficiência com base horária para as PM₁₀ foram tidos em conta todos os dias com valores horários disponibilizados, mesmo os que segundo a legislação não apresentam valores suficientes (dias com menos de 18 médias horárias).

Posteriormente foi analisada para cada estação, a evolução das concentrações médias anuais para o NO₂ e PM₁₀ (e respetivo cumprimento dos valores limite anuais permitidos por lei). Obtiveram-se ainda os histogramas com base na concentração média horária para o NO₂ e na concentração média diária para as PM₁₀ para todas as estações, para o período de 2010 a janeiro de 2015 e para o ano completo mais recente (2014). Esta análise foi feita com o objetivo de avaliar a distribuição dos dados durante a série temporal considerada e comparar com o ano mais recente.

Com o objetivo de perceber se as estações se encontravam em cumprimento legal do número máximo de excedências aos valores limite de curto prazo, foram também analisadas as ultrapassagens ao valor limite horário para o NO₂ e ao valor limite diário para as PM₁₀. Mais uma vez, foram calculadas as médias diárias de PM₁₀ e respetivas excedências ao valor limite diário sem os critérios de agregação de dados exigidos pela legislação – ter pelo menos 75%

das médias horárias. Nesta tese, estes critérios não foram considerados de forma a se poder trabalhar com um maior número de médias diárias e de excedências.

Por último, foi feita uma análise do número de excedências aos valores limite de curto prazo e a 90% desses valores, para o NO_2 e PM_{10} , para todas as estações. Foram comparados o número de excedências a cada valor de modo a perceber se os limites estabelecidos por lei são cumpridos com alguma margem ou se as estações se encontram próximas do incumprimento, mesmo quando não estão.

3.2.2 Avaliação de excedências

A caracterização das excedências aos valores limite de curto prazo foi feita para os poluentes NO_2 e PM_{10} (valor limite horário e diário, respetivamente) com o objetivo de identificar quando ocorreram estas ultrapassagens. Foi ainda analisada a influência da meteorologia na ocorrência de excedências. A metodologia seguida encontra-se resumida na Figura 3.7.

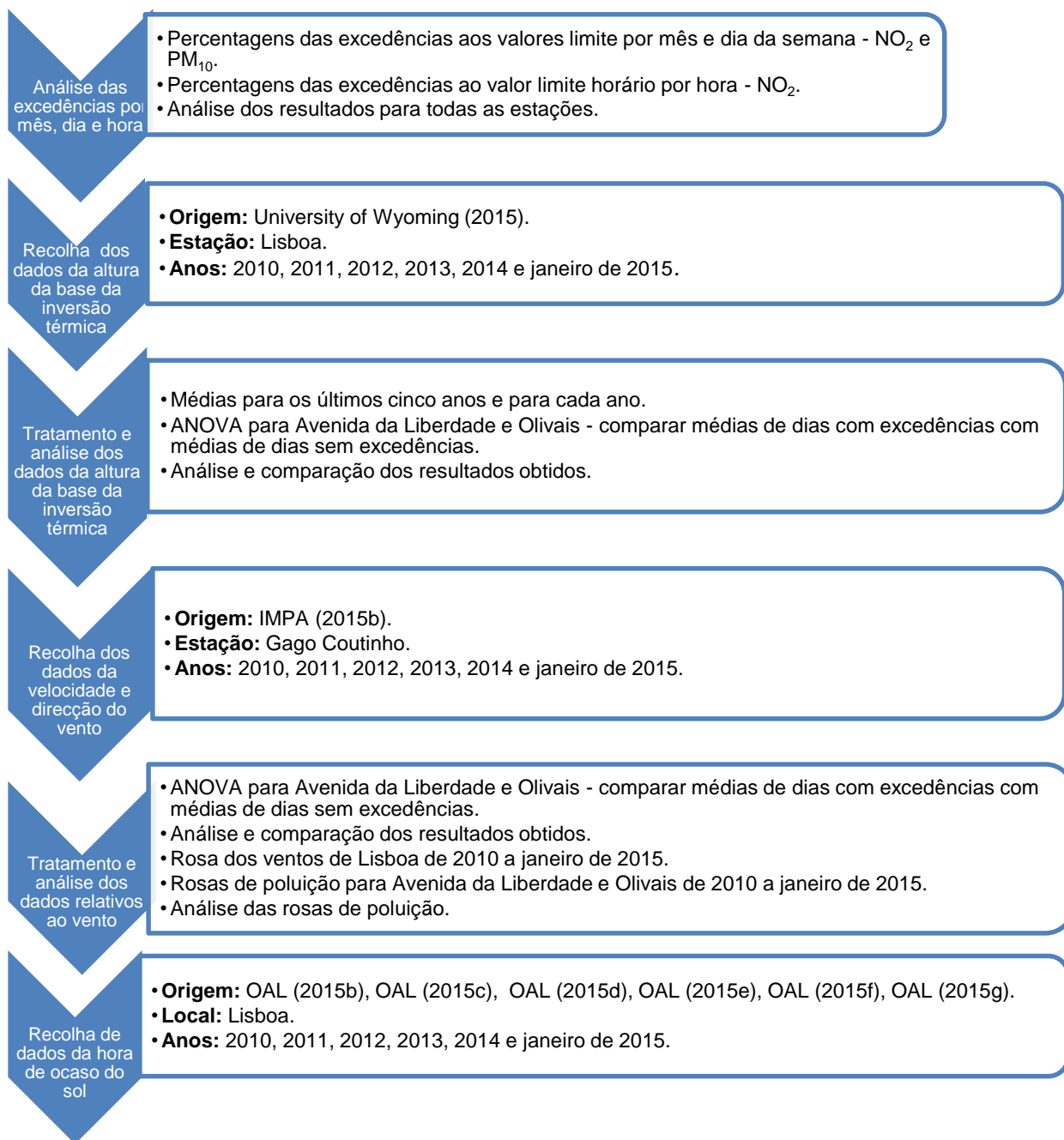


Figura 3.7 - Esquema da metodologia seguida para a caracterização das excedências aos valores limite de curto prazo nos últimos cinco anos.

Segundo a Figura 3.7, as percentagens das excedências ao valor limite horário para o NO₂ foram calculadas por mês, dia da semana e hora. Para as PM₁₀ foram apenas calculadas as percentagens de excedências ao valor limite diário por mês e dia da semana. Posteriormente foram analisados e comparados estes valores, tendo também em conta as estações do ano e dia útil vs. fim-de-semana. Esta análise foi feita para detetar a ocorrência de possíveis padrões e comportamentos semelhantes na ocorrência das excedências.

Em segundo lugar foi analisada a influência da meteorologia nas excedências aos valores limite de curto prazo, com o objetivo de detetar fatores determinantes na ocorrência de ultrapassagens. Os dados meteorológicos analisados consistiram na altura da base da

inversão térmica, na velocidade média do vento, na direção do vento e na hora de ocaso do sol.

Foram analisados estes parâmetros visto que a altura da camada de mistura é dos parâmetros mais críticos em estudos de qualidade do ar por limitar a dispersão dos poluentes atmosféricos (Chou, *et al.*, 2007), tal como a velocidade e a direção do vento (Ghafghazi & Hatzopoulou, 2015). Todos os dados são relativos ao período de 2010 a janeiro de 2015 e foram tratados com recurso ao *software Microsoft Office Excel*[®].

A análise foi feita para os poluentes PM₁₀ e NO₂, para a estação da Avenida da Liberdade (estação de tráfego) e dos Olivais (estação de fundo). Para o NO₂ foram comparados os dias em que existiu pelo menos uma média horária superior ao valor limite com os dias em que não existiu nenhuma concentração horária superior a esse valor. No caso das PM₁₀ comparam-se os dias em que a média diária excedeu o valor limite diário com os dias em que não existiu nenhuma ultrapassagem a esse valor.

A informação relativa à altura da base da inversão térmica foi obtida no *website* da *University of Wyoming* (University of Wyoming, 2015). Esta série de dados foi analisada, calculando-se a média total da série e a respetiva a cada ano. Posteriormente foi feito o tratamento estatístico de modo a comparar a média da altura da base da inversão térmica dos dias em que se registaram excedências com a média dos dias em que não existiram ultrapassagens aos valores limite. Sendo este o objetivo, recorreu-se a uma análise de variância (ANOVA) a um fator, com um nível de significância de 0,05 (95% de confiança) para avaliação da existência ou não de diferenças a nível estatístico entre as médias consideradas.

Os dados da intensidade média do vento e da respetiva direção foram cedidos pelo Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA, 2015b), tendo sido medidos na estação meteorológica da Avenida Gago Coutinho. Esta estação foi escolhida por ser normalmente considerada a mais representativa da cidade de Lisboa e por ter a melhor caracterização do vento (DCEA-FCT/UNL, 2013).

Obteve-se ainda a rosa-dos-ventos para a cidade de Lisboa, com os dados da intensidade média e da direção do vento. Seguiu-se a análise das rosas de poluição para a estação da Avenida da Liberdade e dos Olivais, obtidas com a direção do vento e com as médias diárias relativas ao NO₂ e às PM₁₀, do período entre 2010 e janeiro de 2015. Para perceber se existia alguma relação de dependência entre as excedências aos valores limite e o ocaso do sol (horas de ocaso obtidas através do Observatório Astronómico de Lisboa), recorreu-se a tabelas de contingência e ao teste do qui-quadrado.

Para além desta análise das excedências a curto prazo, foi ainda avaliado o efeito das mesmas nas médias anuais, em todas as estações. No caso do NO₂, foi analisada a evolução da concentração média anual sem as médias horárias superiores ao valor limite e ainda sem os dias com pelo menos uma média horária superior ao valor limite. No caso das PM₁₀ foi analisada a evolução da concentração média anual entre 2010 e janeiro de 2015 sem o efeito de médias horárias superiores a 50 µg/m³ (valor limite diário) e ainda sem as médias diárias superiores ao valor limite diário legal.

3.3 Estudo da influência da ZER na qualidade do ar

Outro dos objetivos desta dissertação passou por estudar a influência da ZER na qualidade do ar na cidade de Lisboa, nomeadamente da fase II, visto ser com esse fim que a ZER foi implementada. O objetivo inicial consistia em avaliar o impacto da fase III, no entanto, quando se iniciou esta dissertação não estavam disponíveis dados suficientes para analisar a

qualidade do ar tendo em conta esta fase, visto que esta só foi implementada em janeiro de 2015.

Dividiu-se então a análise no período antes (1 de janeiro de 2010 a 31 de março de 2012) e no período depois da implementação da fase II da ZER (1 de abril de 2012 a 31 de janeiro de 2015). Também não faria sentido analisar a influência da fase I (ou excluir o tempo em que esta esteve em vigor da análise feita) visto que nesta fase a percentagem de veículos afetados que utilizaram a área no período útil foi bastante limitada (DCEA-FCT/UNL, 2013). Os poluentes analisados foram também o NO_2 e as PM_{10} e utilizaram-se os dados referidos na secção 3.2.

3.3.1 Avaliação de excedências

Com o objetivo de avaliar o impacto da fase II da ZER na qualidade do ar, analisaram-se novamente as excedências aos valores limite de curto prazo para os poluentes NO_2 e PM_{10} mas neste caso antes e depois da implementação desta fase. A metodologia utilizada encontra-se resumida na Figura 3.8.

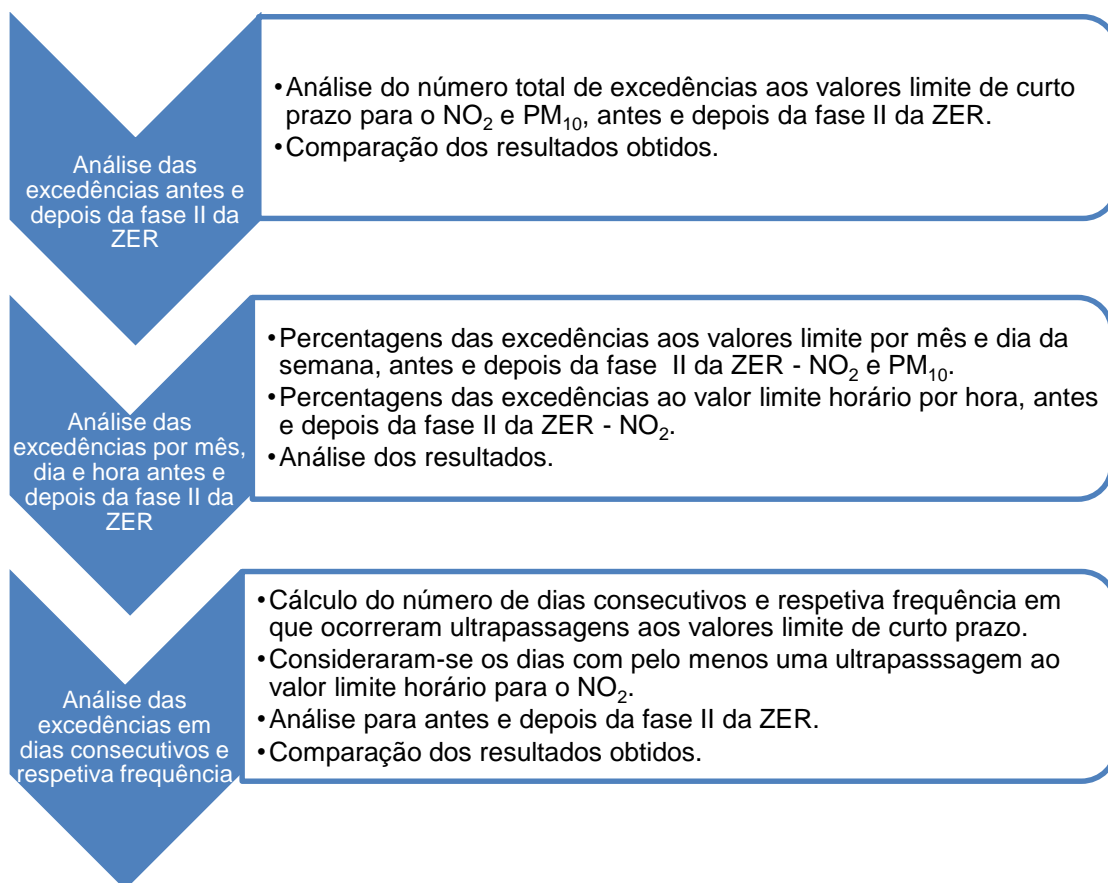


Figura 3.8 - Esquema da metodologia seguida para a caracterização das excedências aos valores limite de curto prazo, antes e depois da implementação da fase II da ZER.

3.3.2 Avaliação de excedências em comum aos poluentes analisados

Analisaram-se e caracterizaram-se os dias com excedências em comum aos poluentes NO₂ e PM₁₀. Esta análise foi feita de modo a caracterizar estas excedências, bem como perceber se existiu alguma alteração antes e depois da fase II da ZER. Foram também analisados e comparados os maiores episódios em comum aos dois poluentes identificados, um antes e outro depois da implementação da fase II. A metodologia utilizada encontra-se na Figura 3.9.

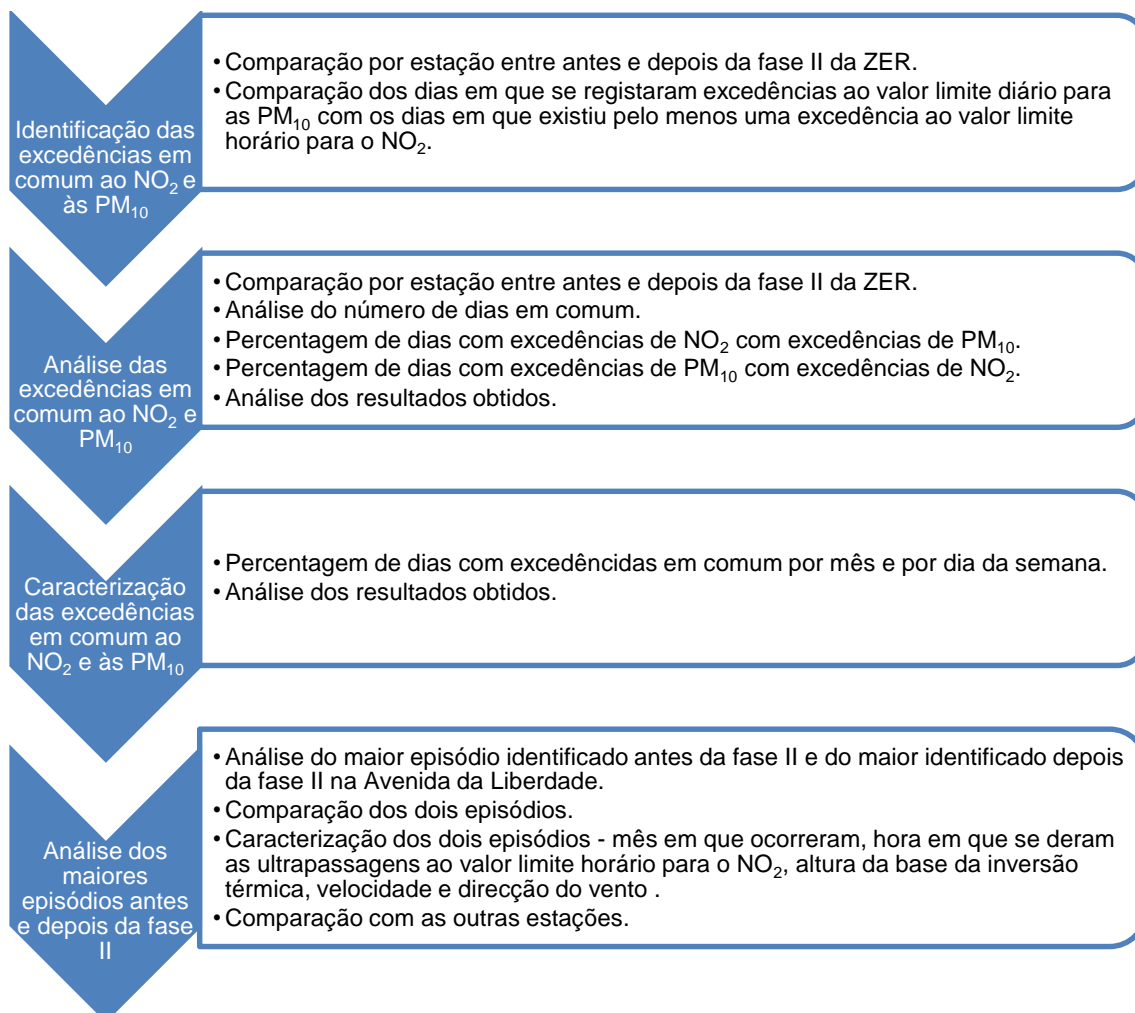


Figura 3.9 - Esquema da metodologia seguida para a caracterização das excedências em comum ao NO₂ e às PM₁₀ e para a análise dos maiores episódios em comum, antes e depois da fase II da ZER.

3.4 Dados de tráfego rodoviário e cálculo de emissões

A recolha de dados relativamente à tipologia, tipo de combustível dos veículos ligeiros e normas Euro por tipologia foi feita pelos alunos da unidade curricular de Poluição e Gestão do Ar do Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente da Universidade Nova de Lisboa. Esta recolha foi feita no ano letivo de 2013/2014 (dados de 2014) e no ano letivo de 2014/2015 (dados de 2015).

Em 2014, a recolha foi feita em 14 locais (Tabela 3.3 e Figura 3.10) de 27 de março a 17 de abril de 2014. Em 2015 a recolha foi feita em 18 locais (os locais adicionados encontram-se a azul na Tabela 3.3) de 14 a 30 de abril de 2015. Os locais de amostragem localizados em limites da ZER, onde é permitido circular sem restrições, foram considerados como fora da

ZER. São o caso a Avenida dos EUA e a Avenida de Ceuta, visto as medições terem sido feitas no sentido de circulação destas avenidas. Já o ponto de Sete Rios está localizado depois do limite da ZER nessa zona, tendo sido por isso considerado como zona 2.

Tabela 3.3 - Locais utilizados para o recenseamento do tráfego e respetiva zona da ZER em que se inserem.

Local	Identificação do local	Zona
1	Praça de Espanha	Zona 2
2	Sete Rios	Zona 2
3	Av. Índia	Fora ZER
4	Av. Eng. Duarte Pacheco	Zona 2
5	Av. De Ceuta	Fora ZER
6	Av. Do Brasil	Fora ZER
7	Sta. Apolónia	Zona 2
8	Av. EUA (semáforo)	Fora ZER
9	Av. da Liberdade (R. Alexandre Herculano)	Zona 1
10	Av. Infante D. Henrique	Zona 2
11	Av. Almirante Reis	Zona 2
12	Av. D. Carlos I	Zona 2
13	Ponte das Xabregas	Zona 2
14	Av. D. João II	Fora ZER
15	Av. da Liberdade (Praça da Alegria)	Zona 1
16	Terreiro do Paço	Zona 1
17	Estação Rossio	Zona 1
18	Av. da República	Zona 2

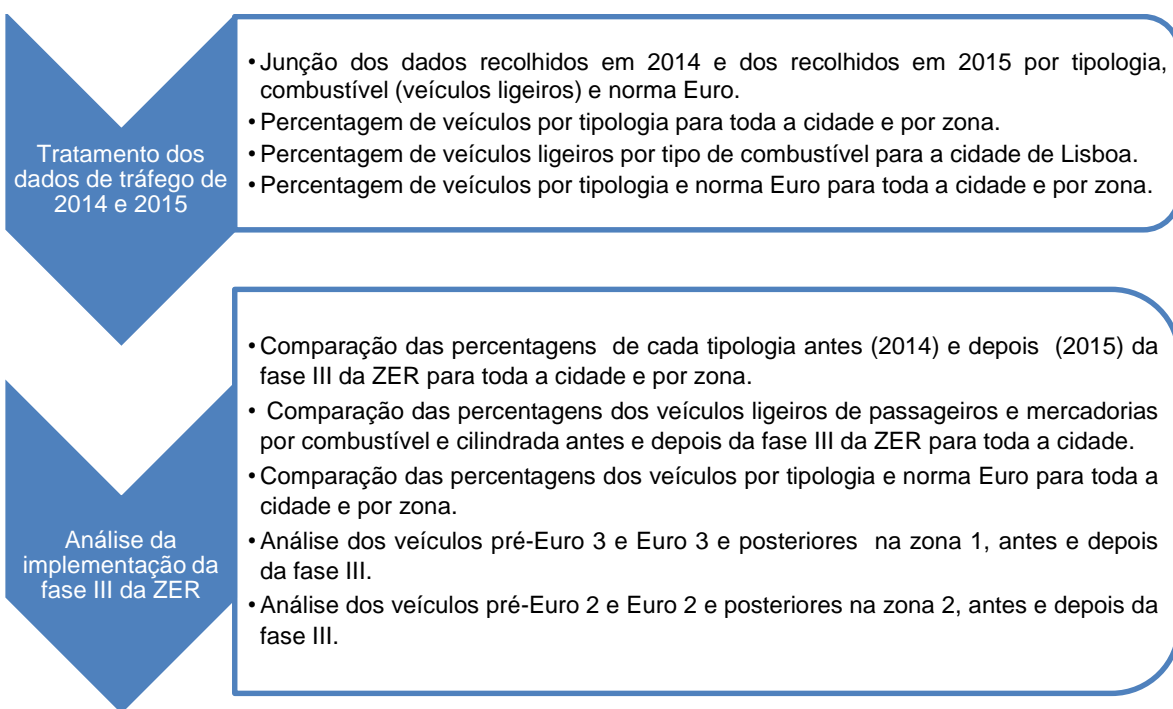


Figura 3.11 - Esquema da metodologia seguida para a análise da frota automóvel antes e depois da fase III da ZER.

Feita esta análise, foi calculada a estimativa de redução de emissões de NO_x e PM antes e depois da implementação da fase III da ZER. O cálculo de emissões foi feito para dois cenários:

1. Manteve-se o número de veículos que circulou na Avenida da Liberdade (considerou-se 2014) para antes e depois da fase III, alterando-se a frota automóvel característica de cada ano.
2. Calcularam-se as emissões o mais próximo possível da realidade com os dados característicos (frota e número de veículos) de cada ano.

As emissões foram calculadas para veículos ligeiros de passageiros, ligeiros de mercadorias, pesados de passageiros e táxis, por norma Euro. Para pesados de mercadorias e motociclos apenas se calcularam as emissões para o ano de 2015 de modo a comparar o peso de cada tipologia nas emissões, visto não existirem dados em 2014 relativos a estas duas tipologias. A comparação entre os dois anos foi feita sem incluir pesados de passageiros e motociclos. Em 2014 considerou-se o único ponto de amostragem existente na Avenida da Liberdade e em 2015 utilizaram-se dois pontos de amostragem (ambos ao longo da Avenida da Liberdade) de modo a aumentar a representatividade estatística em 2015. A metodologia geral de cálculo encontra-se na Figura 3.12.

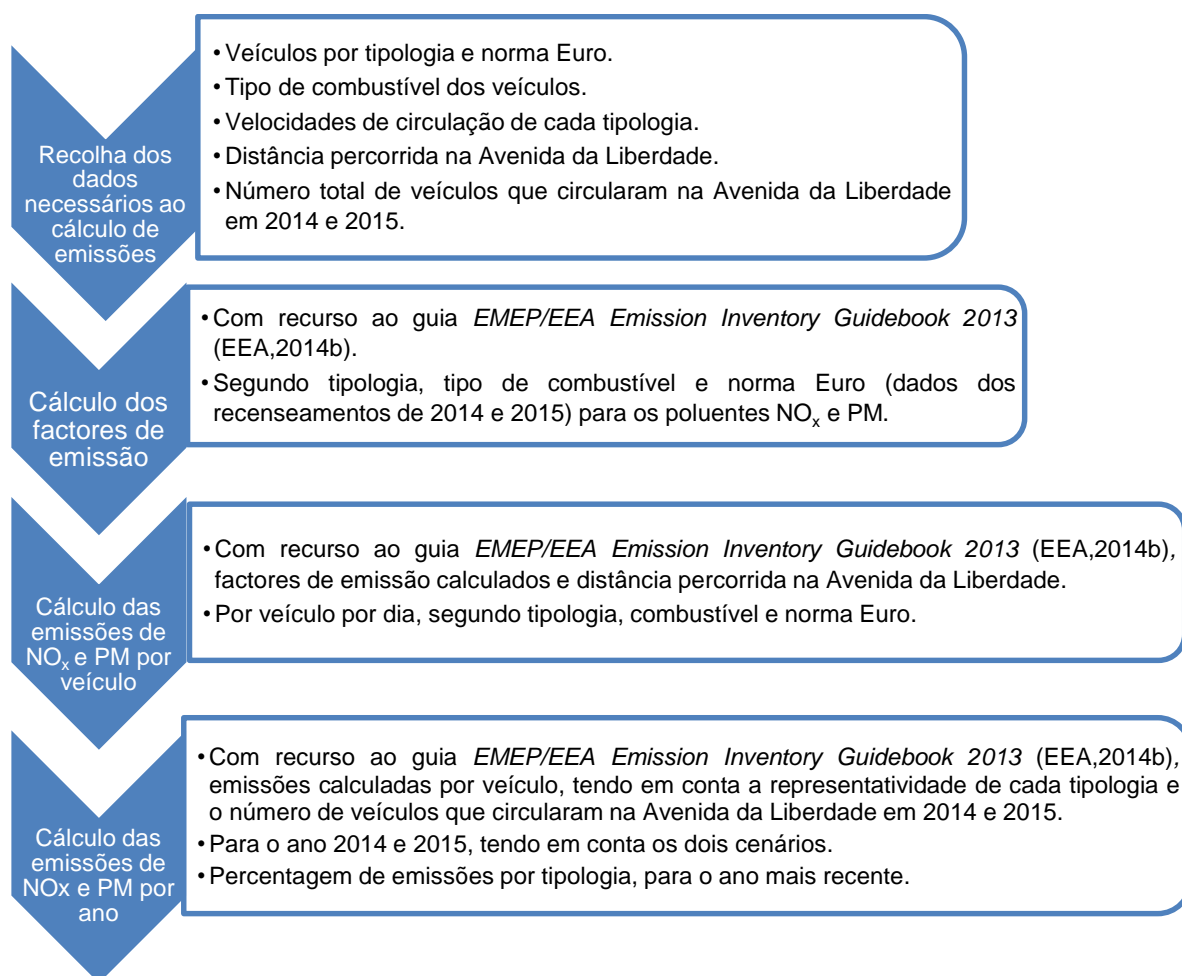


Figura 3.12 - Esquema da metodologia seguida para cálculo das emissões antes e depois da fase III da ZER.

Para o cálculo das emissões de NO_x e PM para todas as tipologias e dos respetivos factores de emissão, recorreu-se ao guia *EMEP/EEA Emission Inventory Guidebook 2013* (EEA, 2014b), atualizado em setembro de 2014. Em todos os casos utilizou-se a equação 1.

$$Emissões (g) = Factor de Emissão (g/km) \times Número de veículos \times Distância percorrida por veículo (km) \text{ (Equação 1)}$$

Para o cálculo do número de veículos, teve-se em conta a representatividade de cada tipologia e norma Euro na zona 1, tendo em conta os dados recolhidos nos recenseamentos. Apesar de um dos objetivos ser calcular as emissões tendo em conta o número de veículos que circularam na Avenida da Liberdade em 2014 e 2015, estes dados não se encontravam disponíveis.

Considerou-se que na cidade circularam cerca de 22 789 veículos por dia no eixo Marquês do Pombal – Terreiro do Paço, em 2012 (Rodrigues, 2013) e que relativamente a esse ano o tráfego diminuiu 5% em 2014 e em 2015 aumentou 21% relativamente a 2014 com base em avaliações anteriores (DCEA-FCT/UNL, 2015). No entanto, como estas percentagens de variação do tráfego médio diário são para toda a ZER, assumiu-se que a variação na zona 1 foi a mesma que no total da ZER. Mais uma vez não existiam dados de variação apenas para a zona 1.

Como a distância percorrida por qualquer tipo de veículo considerou-se o comprimento da Avenida da Liberdade (eixo Marquês do Pombal – Terreiro do Paço) como 1 km (DCEA-FCT/UNL, 2013). Considerou-se ainda ida e volta, perfazendo 2 km percorridos, dado que os dados disponibilizados são para o tráfego no total dos dois sentidos.

Veículos ligeiros e Táxis

Para o cálculo dos fatores de emissão dos veículos ligeiros e táxis utilizaram-se as tabelas 3-37, 3-41, 3-42, 3-45 e 3-47 (EEA, 2014b). Neste passo assumiu-se que os veículos Pré-Euro a gasolina cumpriam a norma ECE 15-04 e que as emissões de partículas eram idênticas às de um veículo Euro 1.

Como velocidade de circulação considerou-se 25 km/h (meio urbano) (DCEA-FCT/UNL, 2013). Para o cálculo das emissões tendo em conta a representatividade de cada tipologia e norma Euro na zona 1, considerou-se que os veículos ligeiros de passageiros eram metade a gasolina e metade a gasóleo. Considerou-se ainda que os veículos ligeiros de mercadorias e os táxis seriam todos a gasóleo com cilindrada <2,0 L.

Veículos Pesados de Passageiros e de Mercadorias

No cálculo dos fatores de emissão das normas pré-Euro à Euro 4 dos veículos pesados de passageiros recorreu-se ao anexo ao guia de 2009 (EEA, 2009). Para os fatores de emissão das normas Euro 5 e 6 recorreu-se ao anexo ao guia de 2013 (EEA, 2014c).

Neste passo assumiu-se a via com declive nulo e que os veículos apresentavam uma carga de 50%. Assumiu-se ainda que os veículos eram rígidos entre 14 e 20 toneladas, sendo que a maioria da frota da Carris tem entre 18 e 19 toneladas (Carris, 2015a) e esta empresa é a responsável pela maioria dos veículos pesados de passageiros que circulam nesta zona da cidade.

A velocidade de circulação considerada foi 14,6 km/h (Carris, 2015b), valor para o ano mais recente disponibilizado (2013). Considerou-se também que todos os veículos pesados de passageiros e mercadorias são a gasóleo.

Motociclos

No cálculo dos fatores de emissão de NO_x e PM dos motociclos utilizou-se a tabela 3-70 do guia de cálculo de emissões (EEA, 2014b) e considerou-se que todos os motociclos eram a quatro tempos, com uma cilindrada inferior a 250 cm³. Como velocidade de circulação também se considerou 25 km/h.

Para o cálculo das emissões teve-se em conta que as normas Euro para os motociclos são diferentes, pelo que os dados do recenseamento de tráfego foram adaptados, visto as contagens terem sido feitas com base nas datas das normas Euro para veículos ligeiros.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Evolução da qualidade do ar nos últimos cinco anos

O objetivo desta análise é avaliar a qualidade do ar ao longo dos últimos cinco anos, focando-se principalmente na avaliação do perfil das excedências aos valores limite legais de curto prazo e na identificação de possíveis padrões, assim como na avaliação da respectiva relação com a meteorologia.

4.1.1 Evolução das séries temporais

Tendo em conta o Decreto-Lei n.º 102/2010, a proporção de dados válidos requerida para a agregação de dados e para o cálculo dos parâmetros estatísticos é de 75% para valores horários e 75% das médias diárias. Na Tabela 4.1, está apresentada a eficiência anual com base horária para ambos os poluentes e a eficiência com base nas médias diárias apenas para as PM₁₀, para todas as estações analisadas. Os valores abaixo de 75% encontram-se a vermelho.

No caso das PM₁₀, as eficiências com base diária são um pouco mais elevadas comparativamente às disponíveis na base de dados QualAr (APA, 2015d), visto ter sido considerado para o cálculo das médias diárias todos os dias com médias horárias disponíveis. Apesar disso, os anos em que as estações têm eficiências inferiores ao requerido por lei são os mesmos na análise feita e na informação disponibilizada pela APA.

Tabela 4.1 - Eficiência anual com base horária para o NO₂ e para as PM₁₀ e eficiência anual com base diária para as PM₁₀, para todas as estações.

		% dados validados (base horária)		% dados validados (base diária)
Estação	Ano	NO ₂	PM ₁₀	PM ₁₀
Avenida da Liberdade	2010	98,8	97,1	98,1
	2011	97,5	96,8	98,6
	2012	91,7	98,9	99,7
	2013	94,7	95,8	97,3
	2014*	96,8	99,1	100,0
	Jan 2015*	98,5	98,8	100,0
Entrecampos	2010	99,8	97,0	100,0
	2011	99,8	95,7	99,2
	2012	98,5	93,8	95,6
	2013	96,1	93,6	95,3
	2014*	99,5	97,2	99,7
	Jan 2015*	99,6	97,6	100,0
Olivais	2010	91,1	51,6	55,6
	2011	94,0	95,2	100,0
	2012	93,8	90,8	95,6
	2013	89,7	95,6	97,8
	2014*	96,8	94,6	97,8
	Jan 2015*	100,0	96,4	100,0

Tabela 4.1 (cont.) - Eficiência anual com base horária para o NO₂ e para as PM₁₀ e eficiência anual com base diária para as PM₁₀, para todas as estações.

		% dados validados (base horária)		% dados validados (base diária)
Estação	Ano	NO ₂	PM ₁₀	PM ₁₀
Restelo	2010	93,7	86,2	89,0
	2011	97,5	92,1	94,0
	2012	95,7	28,5	29,8
	2013	89,7	51,3	52,9
	2014*	99,3	83,5	89,3
	Jan 2015*	100,0	98,4	100,0
Santa Cruz de Benfica	2010	94,6	98,4	99,7
	2011	97,0	96,8	98,4
	2012	84,8	15,1	15,8
	2013	65,5	33,4	36,2
	2014*	55,3	0,0	0,0
	Jan 2015*	100,0	0,0	0,0

*Os dados de 2014 e janeiro de 2015 não estão validados pela CCDD-LVT.

Pela análise da Tabela 4.1 verifica-se que, para a eficiência com base horária relativa ao NO₂, os dados encontram-se válidos para todos os anos e para todas as estações, exceto para a estação de Santa Cruz de Benfica em 2013 e 2014. Relativamente às PM₁₀, tanto para a eficiência com base horária como com base diária, os anos com eficiência menor que 75% são 2010 para Olivais, 2012 e 2013 para Restelo e 2012 e 2013 para Santa Cruz de Benfica, sendo que em 2014 e janeiro de 2015 não existem dados disponíveis.

Sendo assim, na análise das médias anuais e das conformidades legais, foram retiradas as estações com eficiências anuais (com base horária e diária) inferiores a 75%. Já na análise do perfil das ultrapassagens foi considerada toda a série temporal (2010 a janeiro de 2015) com o objetivo de estudar um maior número de valores e deste modo ser possível caracterizar mais excedências no período considerado.

Tendo como objetivo avaliar a evolução da qualidade do ar ao longo dos últimos cinco anos, foram analisadas as concentrações médias anuais de NO₂ e PM₁₀ ao longo da série temporal. Na Figura 4.1 encontra-se apresentada a evolução da concentração média anual de NO₂, entre 2010 e 2014. No geral, é possível observar uma tendência decrescente nas concentrações médias anuais deste poluente em todas as estações, principalmente a partir de 2011. Apesar disso, a estação da Avenida da Liberdade ultrapassou em todos os anos estudados o valor limite anual permitido, o que significa que a qualidade do ar nesta zona ainda não é satisfatória, sendo a zona mais problemática.

Entrecampos apresenta médias anuais superiores ao permitido até 2012, tendo vindo a melhorar até 2014. Santa Cruz de Benfica também esteve em incumprimento em 2010 e 2011 tendo melhorado em 2012. No entanto, como para esta estação as eficiências relativas aos anos 2013 e 2014 não são suficientes, não se consegue aferir se essa diminuição é ou não uma tendência. Já Olivais e Restelo estiveram sempre abaixo do valor limite anual.

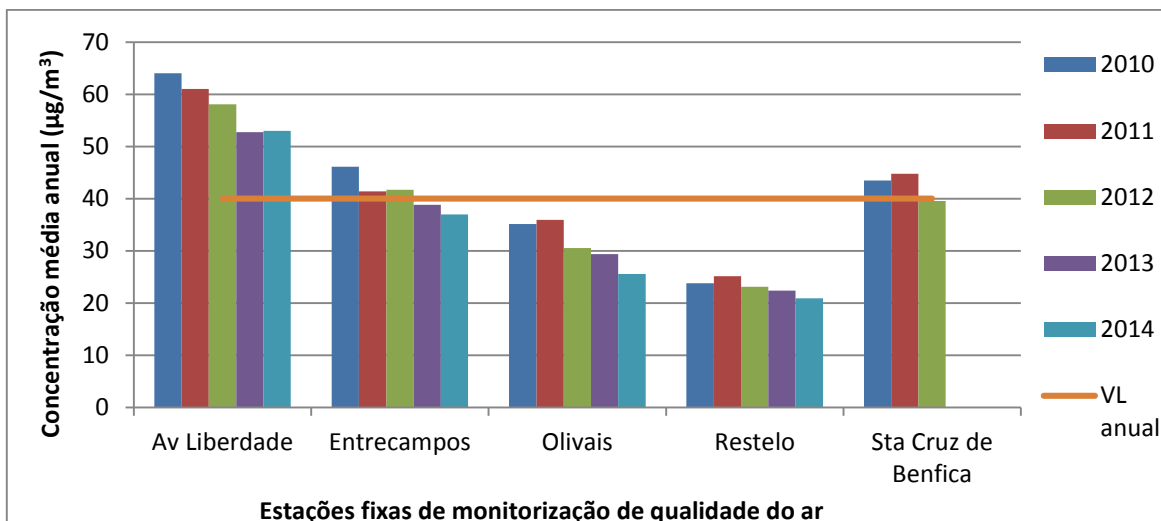


Figura 4.1 - Evolução da concentração média anual de NO₂ (2010 a 2014).

Na Figura 4.2 apresenta-se a evolução da concentração média anual de PM₁₀ de 2010 a 2014. É possível verificar uma tendência decrescente da concentração deste poluente ao longo da série de dados nas várias estações, principalmente em Entrecampos e nos Olivais.

Na Avenida da Liberdade essa tendência só se verifica a partir de 2011, entrando a estação em cumprimento legal do valor limite anual em 2012, mas continuando a ser a estação com valores mais elevados. Em Restelo e Santa Cruz de Benfica retiraram-se os anos com eficiências inferiores ao requerido pelo que não é possível retirar conclusões relativamente à evolução deste poluente. No entanto, parece existir uma diminuição em ambas as estações, apesar de Santa Cruz de Benfica ser a estação mais problemática a seguir à Avenida da Liberdade em 2010 e 2011. É importante considerar que estas médias anuais podem ser influenciadas por dias de eventos naturais. Com o desconto desses dias, verificou-se o cumprimento legal do valor limite anual em 2010 na Avenida da Liberdade e em Santa Cruz de Benfica (APA & DCEA-FCT/UNL, 2011) e em 2011 em Santa Cruz de Benfica (APA & F-FCT/UNL, 2013).

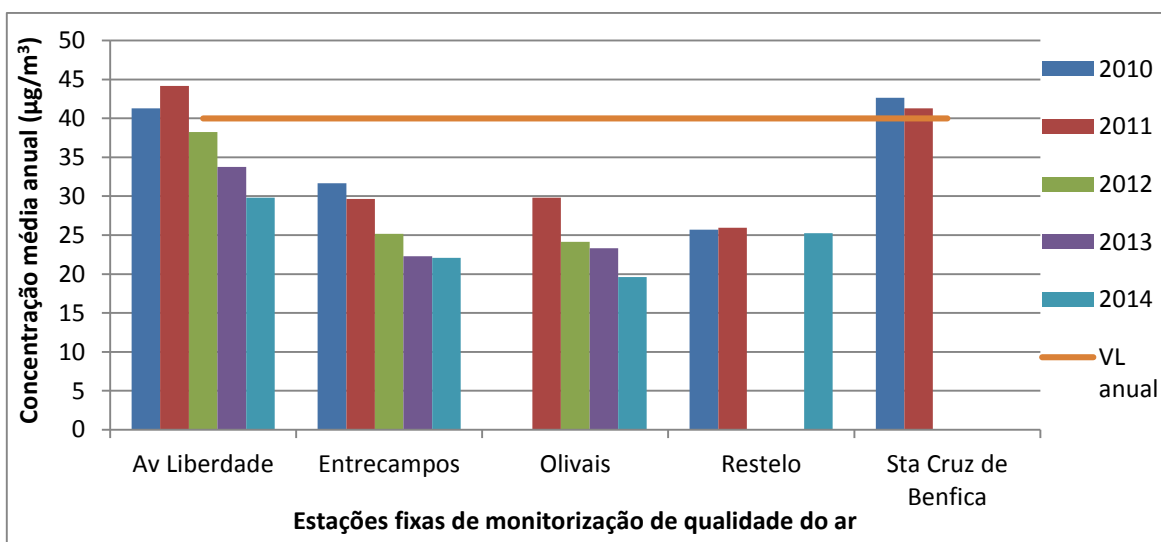


Figura 4.2 - Evolução da concentração média anual de PM₁₀ (2010 a 2014).

Foram ainda analisados os histogramas de frequência das concentrações respetivas a cada poluente, com o objetivo de avaliar a distribuição dos dados durante a série temporal

considerada. Analisaram-se apenas os resultados mais significativos obtidos através de histogramas para a Avenida da Liberdade. O histograma relativo à distribuição das concentrações médias horárias de NO_2 na Avenida da Liberdade, de 2010 a janeiro de 2015, encontra-se na Figura 4.3 e apenas para o ano recente mais completo (2014) na Figura 4.4. De uma forma geral o comportamento é consonante com o esperado para estações de qualidade do ar com estas características, segundo aproximadamente uma distribuição log-normal.

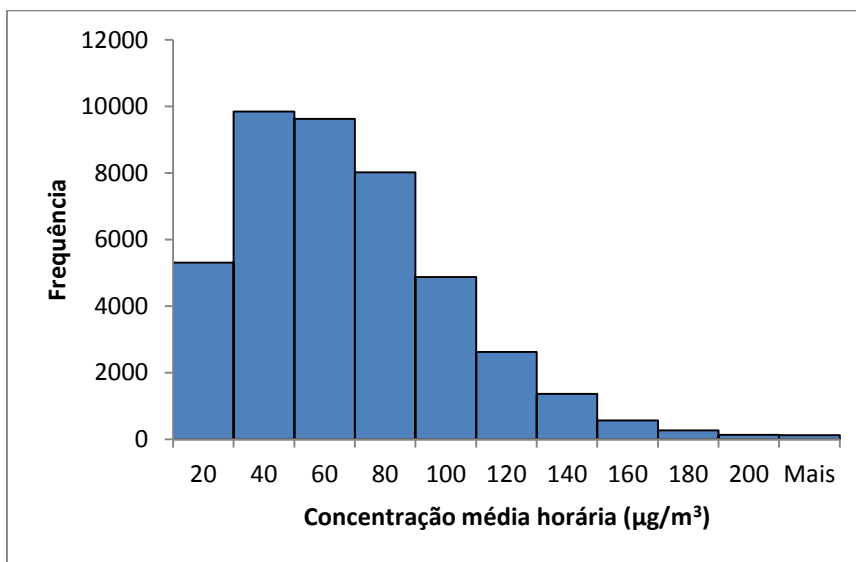


Figura 4.3 - Histograma de frequência das concentrações médias horárias de NO_2 de 2010 a janeiro de 2015 na Avenida da Liberdade.

Observa-se na Figura 4.3 que os valores se concentram maioritariamente entre os 20 e os 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, ocorrendo o pico entre os 20 e os 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Na classe mais próxima do valor limite horário, 180 - 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, encontram-se 0,3% do total de valores.

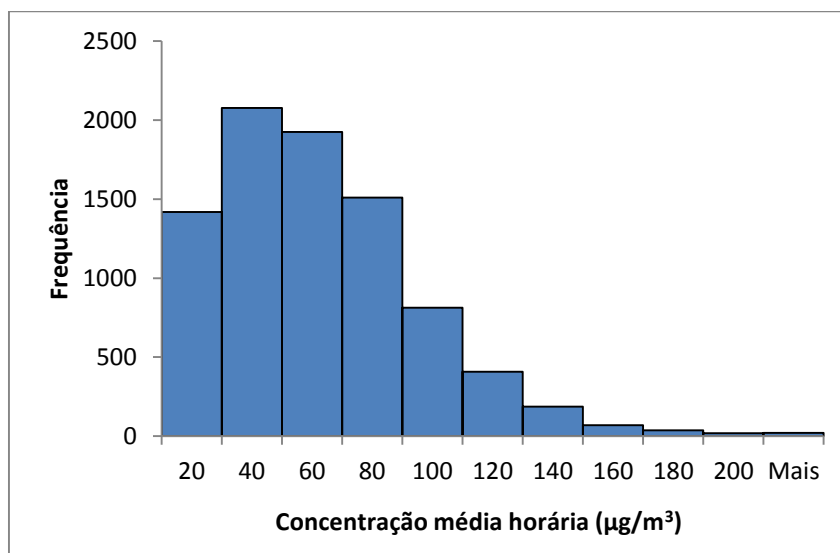


Figura 4.4 – Histograma de frequência das concentrações médias horárias de NO_2 em 2014 na Avenida da Liberdade.

Na Figura 4.4 observa-se que a classe com maior número de valores em 2014 é a dos 20 aos 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, a mesma que nos últimos cinco anos. Os valores na classe entre os 180 e os

200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ representam menos de 0,1% do total de valores. Verifica-se uma melhoria no ano de 2014 comparativamente à análise do total dos últimos cinco anos.

Relativamente às PM_{10} , o histograma de frequência absoluta das concentrações médias diárias na Avenida da Liberdade, de 2010 a janeiro de 2015, encontra-se na Figura 4.5 e apenas para o ano de 2014 na Figura 4.6. É possível observar na Figura 4.5 que a maior frequência de valores se localiza entre os 20 e os 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, sendo o pico na classe dos 25 aos 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Na classe antes do valor limite, ou seja, dos 45 aos 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, concentra-se 8% dos valores totais. A distribuição estatística nestes casos é diferente da relativa ao NO_2 , aproximando-se mais de uma distribuição normal.

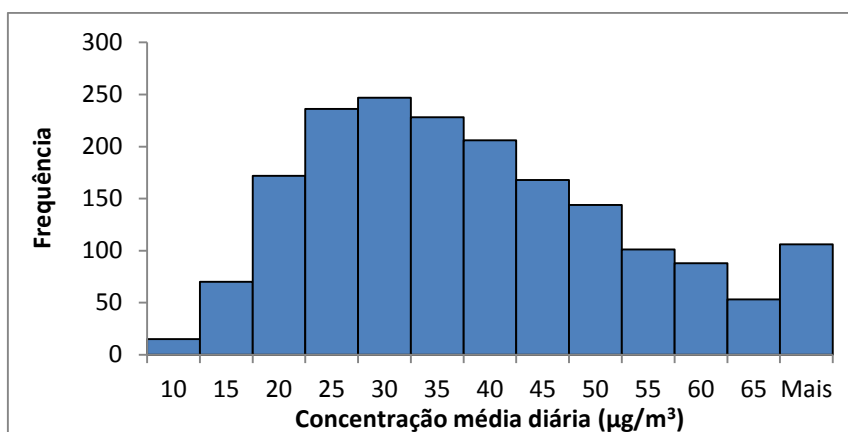


Figura 4.5 – Histograma de frequência das concentrações médias diárias de PM_{10} de 2010 a janeiro de 2015 na Avenida da Liberdade.

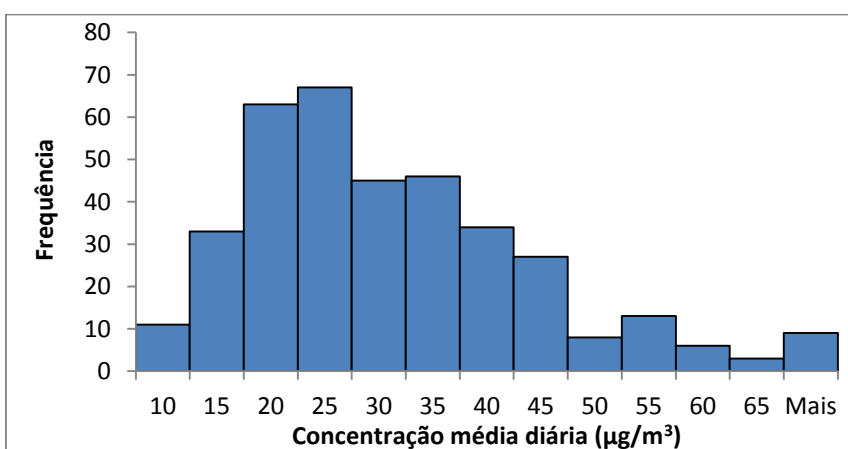


Figura 4.6 - Histograma de frequência das concentrações médias diárias de PM_{10} em 2014 na Avenida da Liberdade.

Na Figura 4.6, verifica-se que para no ano de 2014 a maioria dos valores se distribui nas classes de 15 a 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. O pico localizou-se na classe dos 20 aos 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, uma classe abaixo comparativamente à análise de 2010 a janeiro de 2015. Neste caso, também a percentagem de valores na classe dos 45 aos 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ é inferior em 2014 (2%), verificando-se também uma melhoria em 2014 comparativamente aos últimos cinco anos.

4.1.2 Análise da conformidade legal

De acordo com o Decreto-Lei n.º 102/2010, de 23 de setembro, o valor limite de base horária para o NO_2 é de 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, a não exceder mais de 18 vezes por ano civil. No caso das PM_{10} , o valor limite é de base diária e foi estabelecido no mesmo Decreto-Lei como 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, a não

exceder mais de 35 vezes por ano civil. Analisaram-se as séries temporais de 2010 a janeiro de 2015, com o objetivo de perceber a evolução do número de excedências ao valor limite e se as estações cumpriram ou não o valor máximo permitido por lei. No entanto, como não foram seguidos os critérios de agregação de médias diárias definidos na legislação, no caso das excedências de PM₁₀, o número pode ser mais elevado em alguns anos e estações, comparativamente aos dados da CCDR. Apesar disso, os anos e estações em incumprimento são os mesmos.

Na Figura 4.7 encontra-se o número de excedências ao valor limite horário para o NO₂. Visto tratar-se da verificação de uma conformidade legal, foram retirados os anos de 2013 e 2014 de Santa Cruz de Benfica devido à baixa eficiência da estação nesses anos.

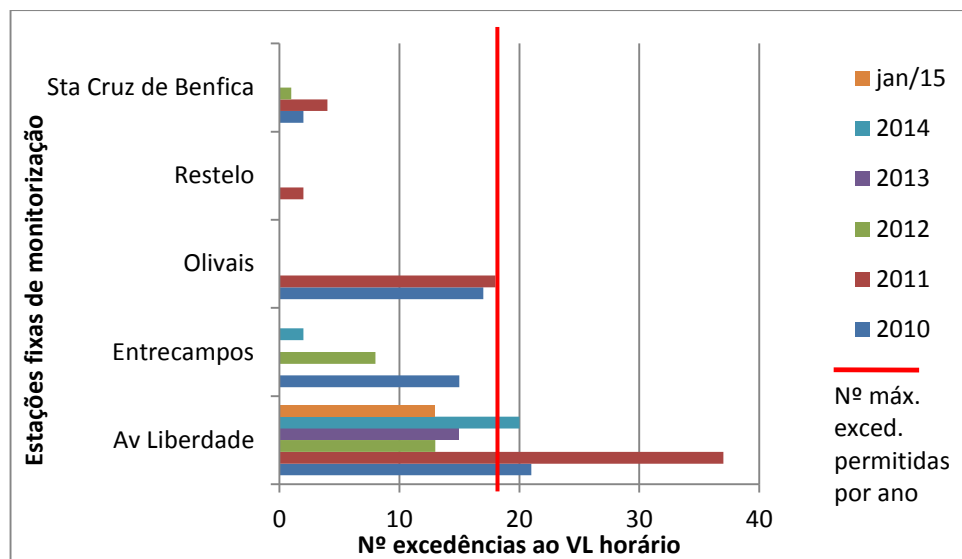


Figura 4.7- Número de excedências ao valor limite horário de NO₂ por ano de 2010 a janeiro de 2015.

Observa-se na Figura 4.7 que a estação da Avenida da Liberdade esteve em incumprimento legal em 2010 e 2011, tendo-se registado uma diminuição que levou ao cumprimento legal em 2012 e 2013, voltando a entrar em incumprimento em 2014. Só no primeiro mês de 2015 verificaram-se 13 excedências ao valor limite das 18 permitidas por lei. Verifica-se novamente a necessidade de melhorar a qualidade do ar na Avenida da Liberdade. As restantes estações encontram-se todas em cumprimento legal ao longo do período analisado. No geral, verifica-se uma diminuição no número de excedências.

As excedências ao valor limite diário para as PM₁₀ encontram-se na Figura 4.8. Neste caso, devido à baixa eficiência das estações nesses anos, foram retirados da análise o ano 2010 dos Olivais, 2012 e 2013 do Restelo e a partir de 2012 (inclusive) de Santa Cruz de Benfica.

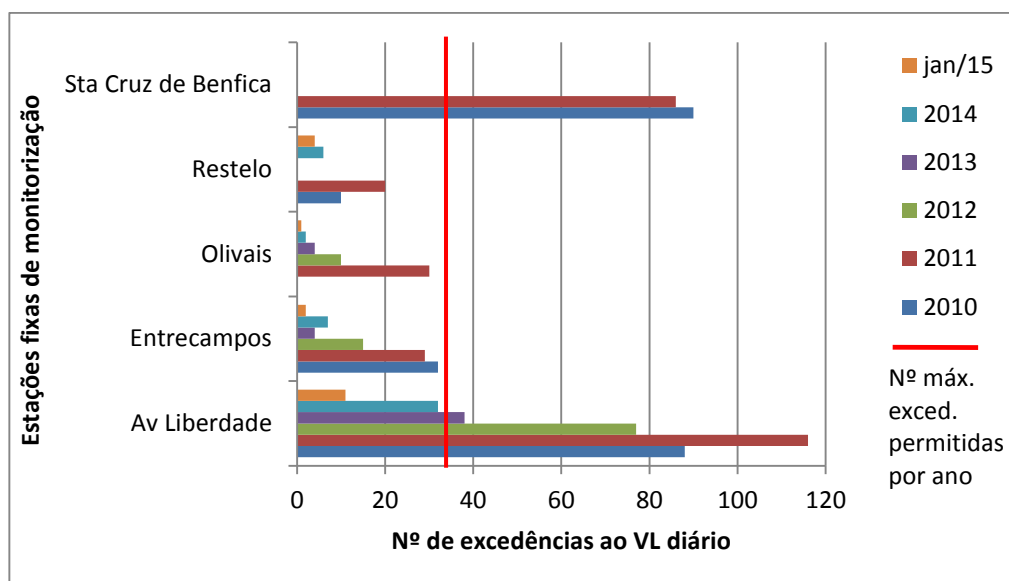


Figura 4.8 - Número de excedências ao valor limite diário de PM₁₀ por ano de 2010 a janeiro de 2015.

É possível observar que a Avenida da Liberdade esteve em incumprimento legal desde 2010 a 2013, tendo vindo a diminuir o número de excedências desde 2011 até entrar em cumprimento em 2014. No entanto, em 2014 o número de excedências encontra-se muito próximo do permitido por lei, o que mais uma vez indica a necessidade de melhorar a qualidade do ar nesta zona.

As restantes estações encontram-se em cumprimento legal ao longo do período considerado, exceto Santa Cruz de Benfica que esteve em incumprimento em 2010 e 2011. Para este poluente, verifica-se mais nitidamente uma diminuição no número de excedências ao longo dos anos. No entanto, é necessário ter em consideração também neste caso que estes valores podem ser influenciados por eventos naturais que aumentam a concentração de PM₁₀. Com o desconto da contribuição desses eventos houve cumprimento legal do número máximo de excedências na Avenida da Liberdade em 2013, tendo o número de excedências passado de 38 para 27 (APA & UNINOVA, 2014).

Com o objetivo de perceber qual a quantidade de valores próximos do valor limite legal em cada ano, foi feita a comparação entre o número de excedências ao valor limite e o número de excedências a 90% desse valor (180 µg/m³ para o NO₂ e 45 µg/m³ para as PM₁₀). Estes valores encontram-se na Tabela 4.2. A vermelho encontram-se os valores que ultrapassam o número máximo de excedências permitidas por ano, a laranja os valores que, tendo em conta as excedências a 90% do valor limite, ultrapassariam o número máximo e a amarelo os valores que ficariam próximos de ultrapassar esse valor.

Nesta análise, foram consideradas todas as estações e todos os anos, visto se estar a fazer apenas uma comparação entre o número de excedências e assim ser possível analisar um maior número de valores.

Tabela 4.2 – Número de excedências aos valores limite de curto prazo e a menos 10% desses valores para o NO₂ e PM₁₀, por ano.

		2010		2011		2012		2013		2014		Jan 2015		2010 a Jan 2015	
		NO ₂	PM ₁₀	NO ₂	PM ₁₀	NO ₂	PM ₁₀	NO ₂	PM ₁₀	NO ₂	PM ₁₀	NO ₂	PM ₁₀	NO ₂	PM ₁₀
Avenida da Liberdade	Excedências VL	21	88	37	119	13	77	15	38	20	32	13	11	119	362
	Excedências 90% VL	58	130	58	157	34	107	37	63	40	42	24	12	251	511
	Diferença	37	42	21	41	21	30	22	25	20	10	11	1	132	149
Entrecampos	Excedências VL	15	32	0	29	8	15	0	4	2	7	0	2	25	89
	Excedências 90% VL	22	47	3	49	18	31	1	6	3	10	1	5	48	148
	Diferença	7	15	3	20	10	16	1	2	1	3	1	3	23	59
Olivais	Excedências VL	17	11	18	30	0	10	0	4	0	2	0	1	35	58
	Excedências 90% VL	28	15	32	48	3	17	0	14	0	5	0	3	63	102
	Diferença	11	4	14	18	3	7	0	10	0	3	0	2	28	44
Restelo	Excedências VL	0	10	2	20	0	10	0	2	0	6	0	4	2	52
	Excedências 90% VL	0	18	3	30	0	14	0	4	0	11	0	6	3	83
	Diferença	0	8	1	10	0	4	0	2	0	5	0	2	1	31
Santa Cruz de Benfica	Excedências VL	2	90	2	86	1	23	0	3	0	SD	0	SD	5	202
	Excedências 90% VL	4	127	10	119	9	28	0	5	0	SD	0	SD	23	279
	Diferença	2	37	8	33	8	5	0	2	0	SD	0	SD	18	81

SD – Sem dados.

Verifica-se através da Tabela 4.2 que as excedências horárias ao valor limite menos 10% no caso do NO₂, ou seja, valores superiores a 180 µg/m³, são quase sempre o dobro das excedências ao valor limite para Avenida da Liberdade, Entrecampos e Olivais em todos os anos. Para as PM₁₀ essa diferença é menos significativa, principalmente na Avenida da Liberdade.

Tendo em conta as excedências a 90% dos valores limite, verifica-se na Avenida da Liberdade que em 2012 e 2013 apesar de a estação estar em cumprimento legal, existem mais do dobro dos valores próximos do valor limite horário para o NO₂. O mesmo se passa para as PM₁₀ em 2014. Ou seja, apesar de nestes casos não se ter ultrapassado o número máximo de excedências por lei, esteve-se muito próximo.

Com esta análise reforça-se a já referida necessidade de reduzir as concentrações dos poluentes em causa, principalmente na Avenida da Liberdade, dada a presença de muitos valores elevados que face a circunstâncias meteorológicas mais adversas em termos de dispersão poderão facilmente passar a ultrapassar os valores limite.

4.1.3 Caracterização detalhada de excedências aos valores limite e avaliação da influência da meteorologia

De modo a caracterizar as excedências aos valores limite e a sua relação com a meteorologia com o objetivo de identificar padrões, foi feita uma análise de quando é que ocorreram as ultrapassagens e em que condições meteorológicas. Esta análise foi feita para os poluentes NO₂ e PM₁₀.

Inicialmente foram estudadas as excedências ao valor limite horário para o NO₂. Na Figura 4.9, apresenta-se a percentagem de excedências ao valor limite em cada mês e para cada estação. Verifica-se que, na Avenida da Liberdade, a maior percentagem de ultrapassagens tem lugar no outono, em outubro.

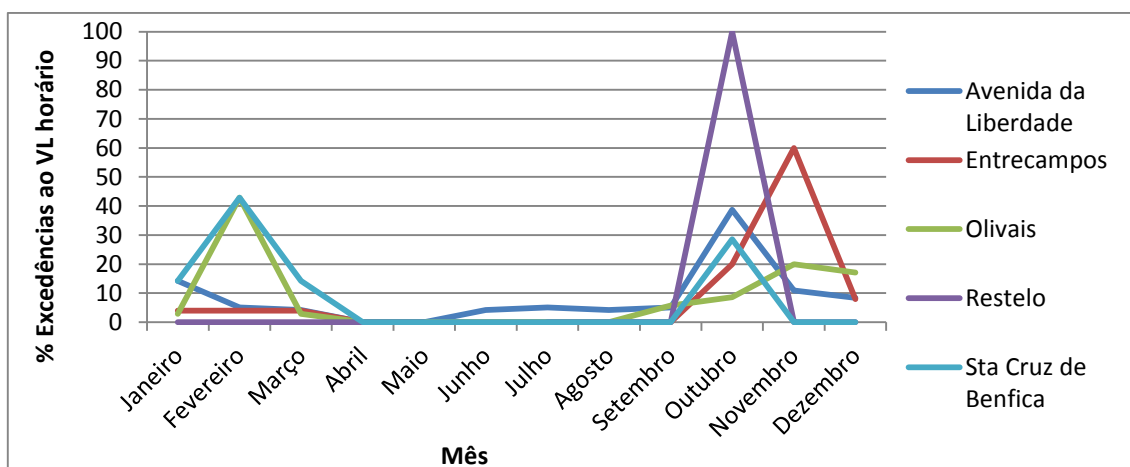


Figura 4.9 - Percentagem de excedências ao valor limite horário por mês para o NO₂, de 2010 a janeiro de 2015, para todas as estações.

Relativamente às restantes estações, verifica-se que em Entrecampos o maior número de excedências também se deu no outono mas no mês de novembro. Já nos Olivais e Santa Cruz de Benfica a maioria das excedências registou-se no inverno, em fevereiro. Apesar de no Restelo 100% dos valores terem ocorrido em outubro, é necessário destacar que esta estação apenas registou duas ultrapassagens ao valor limite.

O facto da maioria dos valores se ter registado nos meses de outubro e fevereiro, pode estar relacionado com fatores meteorológicos característicos da estação do ano, nomeadamente condições de maior estabilidade atmosférica que favorecem a acumulação dos poluentes.

De seguida, apresenta-se a percentagem de excedências por dia da semana para todas as estações de monitorização (Figura 4.10). Em todas as estações a grande maioria das excedências registou-se em dias úteis, o que coincide com a maior intensidade de tráfego característica dos dias de semana.

O dia da semana com mais excedências varia de estação para estação, não se tendo identificado nenhum padrão comum a todas as estações. Sexta-feira é o dia mais representativo na Avenida da Liberdade, quarta-feira em Entrecampos, segunda-feira nos Olivais e terça-feira em Santa Cruz de Benfica. As únicas duas excedências na estação do Restelo ocorreram à quarta-feira.

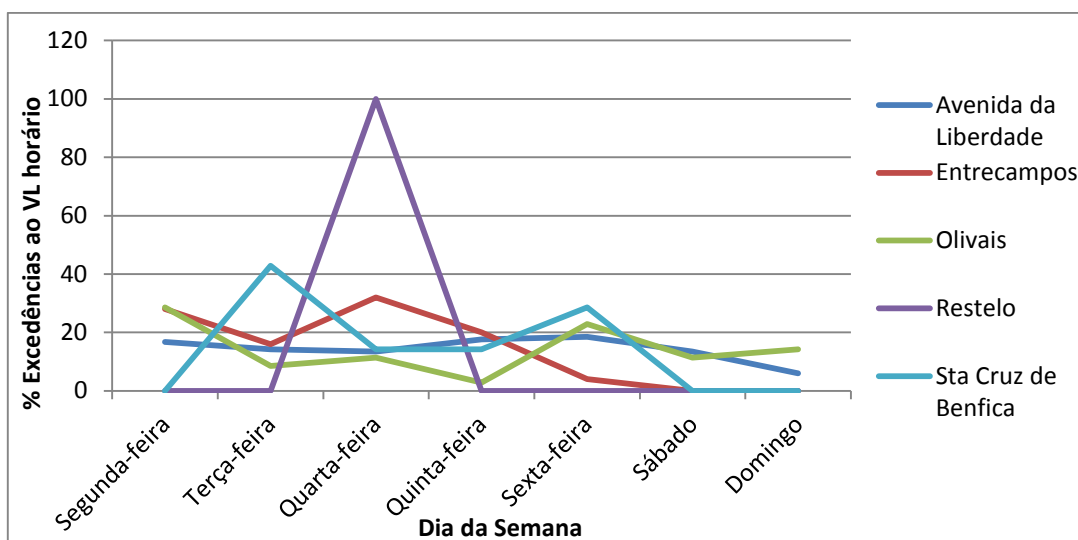


Figura 4.10 - Percentagem de excedências ao valor limite horário por dia da semana para o NO₂, de 2010 a janeiro de 2015, para todas as estações.

Analisando agora a que horas ocorreram a maioria das excedências (Figura 4.11), na Avenida da Liberdade, a maior percentagem de valores registou-se às 19h, tal como nos Olivais. Em Entrecampos, a hora em que se registaram maior número de excedências foi às 8h, e em Santa Cruz de Benfica a maioria registou-se às 8h e às 9h. No Restelo, as únicas duas excedências horárias registaram-se às 20h e às 21h. Estes resultados podem ser explicados pela ocorrência dos picos de tráfego da manhã e do fim do dia, devido aos movimentos pendulares casa-trabalho e vice-versa.

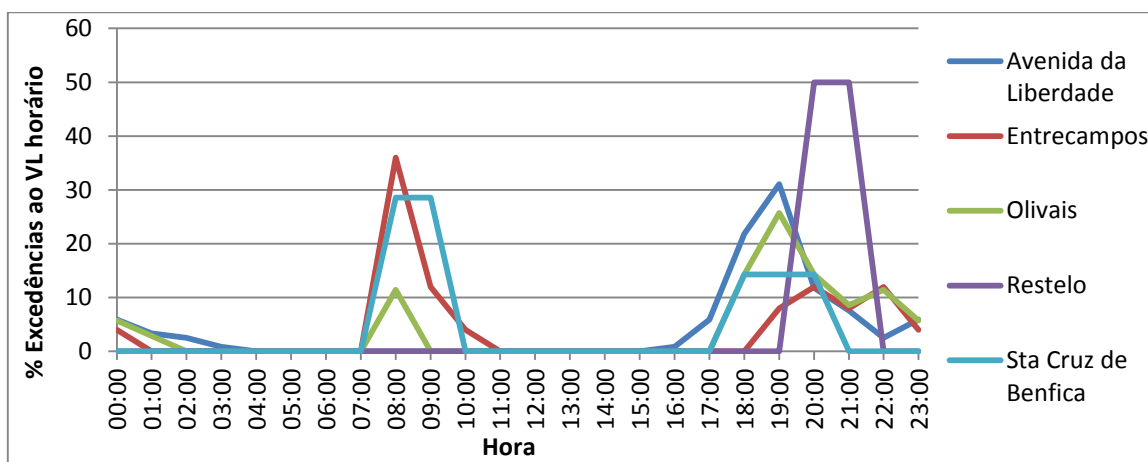


Figura 4.11 - Percentagem de excedências ao valor limite horário por hora do dia para o NO₂, de 2010 a janeiro de 2015, para todas as estações.

Foi feita a mesma análise para as excedências ao valor limite diário para as PM₁₀. As excedências por mês registadas nas estações da Avenida da Liberdade, Entrecampos, Olivais, Restelo e Santa Cruz de Benfica apresentam-se na Figura 4.12.

Na Avenida da Liberdade, a maioria das concentrações superiores ao valor limite registou-se no outono e no inverno equitativamente. No entanto, tal como no caso do NO₂, o mês com mais excedências é outubro. Nas estações de Entrecampos, Olivais e Restelo a maioria das ultrapassagens também se registou no outono e em outubro. Em Santa Cruz de Benfica a maioria registou-se no inverno, nomeadamente em fevereiro.

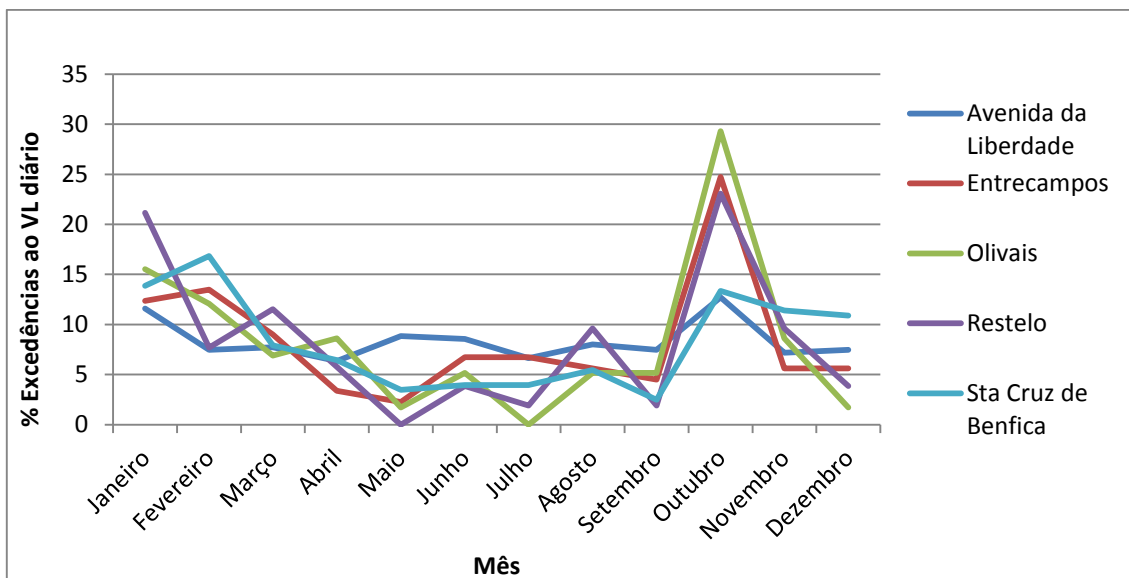


Figura 4.12 - Percentagem de excedências ao valor limite diário por mês para as PM₁₀, de 2010 a janeiro de 2015, para todas as estações.

Relativamente ao dia da semana, verifica-se pela Figura 4.13 que, para todas as estações, a maioria dos valores se regista em dias úteis. Na Avenida da Liberdade os dias da semana com mais excedências são quinta-feira e sexta-feira, sendo que em Santa Cruz de Benfica a maioria se regista à quinta-feira. Para Entrecampos e os Olivais o dia da semana onde se registaram mais excedências é quarta-feira e para o Restelo é segunda-feira.

Verifica-se uma maior concentração das excedências a meio da semana, comparando as várias estações. Este facto é mais notório neste caso, já que no caso do NO₂ há uma maior dispersão pelos dias úteis. Mais uma vez, a concentração das excedências durante a semana está relacionada com o tráfego rodoviário mais intenso nesses dias.

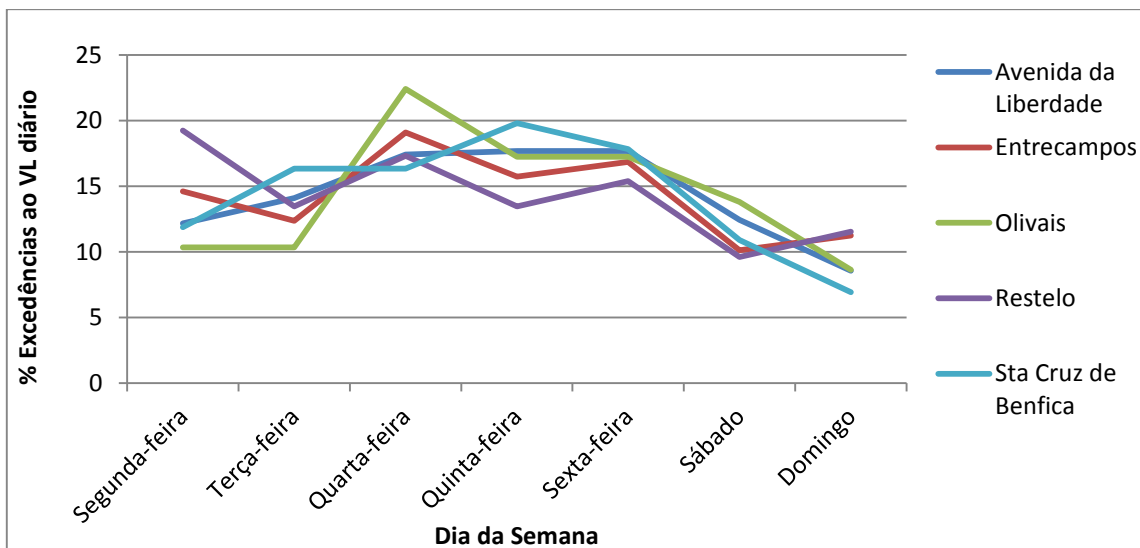


Figura 4.13 - Percentagem de excedências ao valor limite diário por dia da semana para as PM₁₀, de 2010 a janeiro de 2015, para todas as estações.

Altura da base da inversão térmica

Analisada a altura em que ocorreram as excedências aos valores limite, partiu-se para a análise da relação da altura da base da inversão térmica registada para a cidade de Lisboa com as ultrapassagens identificadas. As médias para os últimos cinco anos e para cada ano apresentam-se na Tabela 4.3. Não se verificam diferenças muito significativas nas médias das alturas entre os anos, sendo que a de 2014 é a mais elevada.

Tabela 4.3 - Médias das alturas da base da inversão térmica para os últimos cinco anos e para cada ano.

Período	Média da altura da base da inversão térmica (metros)
2010 a janeiro de 2015	1188
2010	1227
2011	1063
2012	1211
2013	1157
2014	1273
Janeiro de 2015	934

Compararam-se então, para a Avenida da Liberdade (estação de tráfego) e para Olivais (estação de fundo), as médias da altura da inversão térmica relativas aos dias com ultrapassagens aos valores limite com a média relativa aos dias em que não existiram ultrapassagens desse valor. Esta análise foi feita para os dois poluentes em separado, recorrendo a uma ANOVA a um fator. As hipóteses consideradas foram as seguintes:

H_0 : As médias da altura da base da inversão térmica para dias com e sem ultrapassagens são idênticas.

H_1 : As médias da altura da base da inversão térmica para dias com e sem ultrapassagens são diferentes.

No caso do NO_2 , compararam-se os valores relativos aos dias com pelo menos uma média horária superior a $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ com os dias em que não existiu nenhuma concentração superior a esse valor. Obteve-se o resultado apresentado na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Resultado da ANOVA a um fator para verificar se a média da altura da base da inversão térmica é diferente para dias com e sem ultrapassagens ao valor limite horário no caso do NO_2 , na Avenida da Liberdade.

SUMÁRIO						
Grupos	Contagem	Soma	Média	Variância		
Média horária >200	53	24478	462	176629,5		
Média horária <=200	1470	1802681	1226	850069,8		
ANOVA						
Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	valor P	F crítico
Entre grupos	29895650	1	29895650	36,1475	2,29E-09	3,84758
Dentro de grupos	1,26E+09	1521	827046,2			
Total	1,29E+09	1522				

Pela Tabela 4.4 verifica-se que o valor P é inferior ao nível de significância considerado (0,05) o que implica a rejeição de H_0 e que se aceite a hipótese alternativa, H_1 . Assim, a diferença de 764 metros verificada entre as médias dos dois grupos em causa aponta para uma diferença estatisticamente significativa entre os períodos com concentrações acima e abaixo do valor limite.

Os resultados da mesma análise repetida para os Olivais, apresentam-se na Tabela 4.5. No caso dos valores registados na estação dos Olivais, verifica-se novamente que a média da base da inversão térmica é menor para os dias com pelo menos uma média horária superior a $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Tabela 4.5 - Resultado da ANOVA a um fator para verificar se a média da altura da base da inversão térmica é diferente para dias com e sem ultrapassagens ao valor limite horário no caso do NO_2 , nos Olivais.

SUMÁRIO						
Grupos	Contagem	Soma	Média	Variância		
Dias c/ média horária >200	16	10488	656	1049513		
Dias s/ média horária <=200	1467	1738662	1185	822057,4		
ANOVA						
Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	valor P	F crítico
Entre grupos	4440577	1	4440577	5,386689	0,020426	3,847745
Dentro de grupos	1,22E+09	1481	824361,1			
Total	1,23E+09	1482				

Para o caso das PM_{10} , compararam-se os valores relativos aos dias em que existiram ultrapassagens das médias diárias a $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ com os valores relativos aos dias em que não se registaram concentrações superiores a esse valor, para a Avenida da Liberdade. O resultado obtido apresenta-se na Tabela 4.6.

Novamente rejeita-se H_0 e aceita-se H_1 , ou seja, verifica-se também o mesmo que para o NO_2 . Neste caso, verifica-se uma diferença de 514 metros entre a média dos dias com concentrações acima do valor limite e a média dos dias sem ultrapassagens, com a média da altura da base de inversão a ser menor no caso dos dias com ultrapassagens ao valor limite.

Tabela 4.6 - Resultado da ANOVA a um fator para verificar se a média da altura da base da inversão térmica é diferente para dias com e sem ultrapassagens ao valor limite diário no caso das PM_{10} , na Avenida da Liberdade.

SUMÁRIO						
Grupos	Contagem	Soma	Média	Variância		
Média diária >50	312	241161	773	594069,5		
Média diária <=50	1245	1601919	1287	847888,5		
ANOVA						
Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	valor P	F crítico
Entre grupos	65842331	1	65842331	82,59978	2,97E-19	3,847446
Dentro de grupos	1,24E+09	1555	797124,7			
Total	1,31E+09	1556				

Os resultados da mesma análise repetida para os Olivais, apresentam-se na Tabela 4.7. Mais uma vez, rejeita-se a hipótese nula H_0 e aceita-se H_1 . É possível verificar o mesmo que para a Avenida da Liberdade, existindo uma diferença estatisticamente significativa entre a média da altura da base da inversão térmica dos dias com concentrações acima do valor limite e dos dias com concentrações abaixo desse valor.

Tabela 4.7 - Resultado da ANOVA a um fator para verificar se a média da altura da base da inversão térmica é diferente para dias com e sem ultrapassagens ao valor limite diário no caso das PM_{10} , nos Olivais.

SUMÁRIO						
Grupos	Contagem	Soma	Média	Variância		
Média diária >50	50	26190	524	313353,6		
Média diária <=50	1349	1640001	1216	857784,1		
ANOVA						
Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	valor P	F crítico
Entre grupos	23081876	1	23081876	27,52141	1,79E-07	3,848124
Dentro de grupos	1,17E+09	1397	838688,1			
Total	1.19E+09	1398				

Com esta análise verifica-se que, tanto para o NO_2 como para as PM_{10} e tanto na Avenida da Liberdade como nos Olivais, as excedências aos valores limite estão associadas a alturas da base da camada de mistura mais baixas, sendo este um fator determinante na ocorrência de ultrapassagens.

Intensidade média do vento e direção do vento

Seguidamente compararam-se para a Avenida da Liberdade e para os Olivais, a média da intensidade do vento dos dias com ultrapassagens aos valores limite com a média dos dias em que não existiram ultrapassagens a esse valor. Mais uma vez, esta análise foi feita para os dois poluentes em separado, recorrendo a uma ANOVA a um fator. Consideraram-se as seguintes hipóteses:

H_0 : As médias da intensidade do vento para dias com e sem ultrapassagens são idênticas.

H_1 : As médias da intensidade do vento para dias com e sem ultrapassagens são diferentes.

Para o NO_2 na Avenida da Liberdade, compararam-se os valores relativos aos dias com pelo menos uma média horária superior ao valor limite com os dias em que não existiu nenhuma concentração superior a esse valor. O resultado apresenta-se na Tabela 4.8.

Verifica-se que o *valor P* é inferior ao alfa considerado (0,05) pelo que se rejeita H_0 e se aceita H_1 . Observa-se uma diferença estatística significativa, de $0,8 \text{ m.s}^{-1}$, entre a média da intensidade do vento dos dias em que existe pelo menos um valor superior a $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e a média dos dias em que não existe nenhuma concentração superior a esse valor. Neste caso, a média é inferior nos dias em que existe pelo menos uma ultrapassagem ao valor limite.

Tabela 4.8 - Resultado da ANOVA a um fator para verificar se a média da intensidade do vento é diferente para dias com e sem ultrapassagens ao valor limite horário no caso do NO₂, na Avenida da Liberdade.

SUMÁRIO						
Grupos	Contagem	Soma	Média	Variância		
Média horária >200	59	153,9	2,6	1,0		
Média horária <=200	1646	5530,9	3,4	1,5		
ANOVA						
Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	valor P	F crítico
Entre grupos	32,18722	1	32,18722	21,77517	3,31E-06	3,846925
Dentro de grupos	2517,309	1703	1,478162			
Total	2549,497	1704				

Repetiu-se a mesma análise para a estação dos Olivais. Os resultados apresentam-se na Tabela 4.9 e pela sua análise rejeita-se mais uma vez H₀. Como para a Avenida da Liberdade, a velocidade do vento é menor, em média, para os dias em que ocorreu pelo menos uma ultrapassagem ao valor limite. Neste caso a diferença é, aproximadamente, 1,3 m.s⁻¹, sendo superior comparativamente aos dados analisados para a Avenida da Liberdade.

Tabela 4.9 - Resultado da ANOVA a um fator para verificar se a média da intensidade do vento é diferente para dias com e sem ultrapassagens ao valor limite horário no caso do NO₂, nos Olivais.

SUMÁRIO						
Grupos	Contagem	Soma	Média	Variância		
Média horária >200	17	33,9	2,0	0,3		
Média horária <=200	1644	5471,2	3,3	1,5		
ANOVA						
Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	valor P	F crítico
Entre grupos	29,93667	1	29,93667	20,70423	5,75E-06	3,84707
Dentro de grupos	2398,782	1659	1,445921			
Total	2428,719	1660				

Para o caso das PM₁₀ compararam-se novamente os valores relativos aos dias em que existiram ultrapassagens ao valor limite diário legal com os valores relativos aos dias em que não se registaram concentrações superiores a esse valor. O resultado da ANOVA encontra-se na Tabela 4.10. Tal como para o NO₂, rejeita-se H₀ e aceita-se H₁, em ambos os casos. Verifica-se que a média da velocidade do vento é inferior para os casos em que há ultrapassagens ao valor analisado.

Tabela 4.10 - Resultado da ANOVA a um fator para verificar se a média da intensidade do vento é diferente para dias com e sem ultrapassagens ao valor limite diário no caso das PM₁₀, na Avenida da Liberdade.

SUMÁRIO						
Grupos	Contagem	Soma	Média	Variância		
Média diária >50	362	852,7	2,4	0,8		
Média diária <=50	1472	5017,1	3,4	1,7		
ANOVA						
Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	valor P	F crítico
Entre grupos	322,0583	1	322,0583	214,1133	6,12E-46	3,84654
Dentro de grupos	2755,601	1832	1,504149			
Total	3077,659	1833				

Na Tabela 4.11 estão apresentados os resultados da ANOVA para a estação dos Olivais. Volta-se a rejeitar H₀. Mais uma vez, a velocidade média do vento é menor nos dias em que houve ultrapassagens ao valor limite.

Tabela 4.11 - Resultado da ANOVA a um fator para verificar se a média da intensidade do vento é diferente para dias com e sem ultrapassagens ao valor limite diário no caso das PM₁₀, nos Olivais.

SUMÁRIO						
Grupos	Contagem	Soma	Média	Variância		
Média diária >50	58	118,2	2,0	0,8		
Média diária <=50	1605	5144,2	3,2	1,7		
ANOVA						
Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	valor P	F crítico
Entre grupos	76,25792	1	76,25792	45,15835	2,49E-11	3,847063
Dentro de grupos	2804,895	1661	1,688678			
Total	2881,153	1662				

Para além da intensidade do vento, analisou-se a relação das excedências com a direção do vento. Na Figura 4.14 apresenta-se a rosa-dos-ventos para a cidade de Lisboa, com os dados relativos ao rumo do vento e à intensidade média do mesmo, medidos na estação Gago Coutinho entre 2010 e janeiro de 2015. Verifica-se que a direção associada a velocidades de vento superiores é Sudoeste, seguindo-se o Norte e o Sul. As velocidades mais baixas ocorrem associadas a Sudeste e Este.

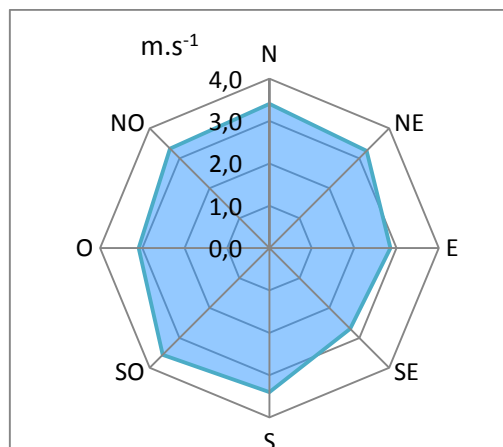


Figura 4.14 - Rosa de ventos de Lisboa (estação Gago Coutinho) para o período de 2010 a janeiro de 2015.

Nas Figuras 4.15 e 4.16 estão representadas as rosas de poluição para os poluentes NO₂ e PM₁₀, respetivamente, para a estação da Avenida da Liberdade, no período de 2010 a janeiro de 2015. Verifica-se que, tanto para o NO₂ como para as PM₁₀, as concentrações mais elevadas estão associadas a rumos de Este e Nordeste. Já as menores concentrações para o NO₂ dão-se associadas aos rumos Sudoeste e Sul, enquanto para as PM₁₀ dão-se associadas a Sudoeste e Oeste. No entanto, as diferenças entre quadrantes são pouco pronunciadas o que pode ser explicado pela estrutura arquitetónica e de relevo da Avenida da Liberdade, em *canyon* pronunciado, que dificulta a dispersão dos poluentes e conduz à recirculação das massas de ar com a consequente ressuspensão dos poluentes e o aumento das suas concentrações (DCEA-FCT/UNL, 2013).

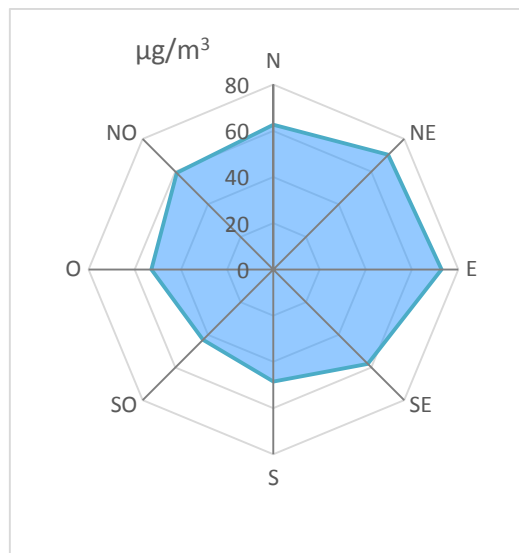


Figura 4.15 - Rosa de poluição para a Avenida da Liberdade referente ao NO₂ para o período de 2010 a janeiro de 2015 (rumo do vento: estação de Gago Coutinho; concentrações: estação da Avenida da Liberdade).

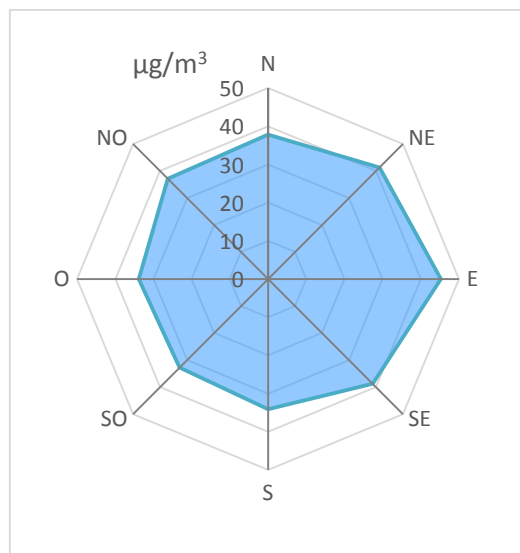


Figura 4.16 - Rosa de poluição para a Avenida da Liberdade referente às PM₁₀ para o período de 2010 a janeiro de 2015 (rumo do vento: estação de Gago Coutinho; concentrações: estação da Avenida da Liberdade).

As rosas de poluição para o NO₂ e PM₁₀, para os Olivais no período de 2010 a janeiro de 2015, encontram-se nas Figuras 4.17 e 4.18. Tal como na Avenida da Liberdade, para o NO₂, as concentrações mais elevadas dão-se associadas aos rumos Este e Nordeste. No caso das PM₁₀, as concentrações mais elevadas verificam-se a Este, Sudoeste e só depois Nordeste. Já as menores concentrações para o NO₂ e PM₁₀ dão-se nos quadrantes Noroeste e Norte.

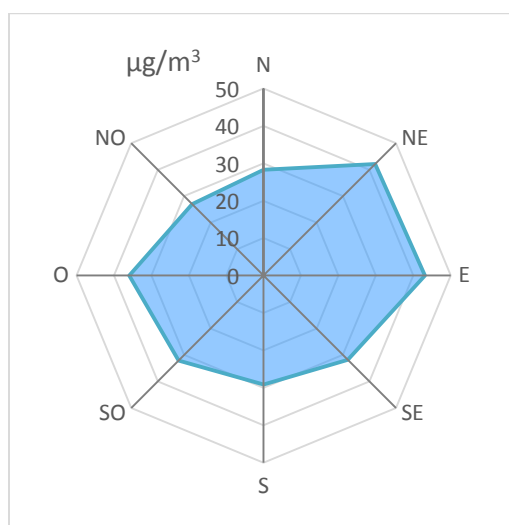


Figura 4.17 - Rosa de poluição para os Olivais referente ao NO₂ para o período de 2010 a janeiro de 2015 (rumo do vento: estação de Gago Coutinho; concentrações: estação dos Olivais).

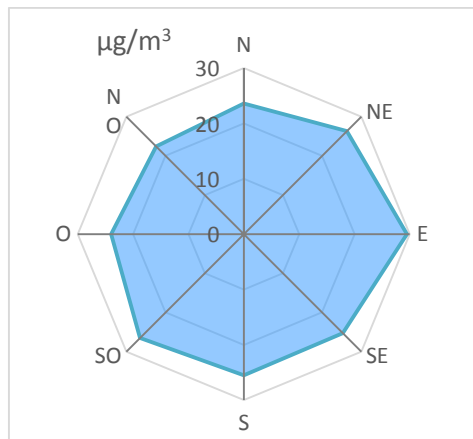


Figura 4.18 - Rosa de poluição para os Olivais referente às PM₁₀ para o período de 2010 a janeiro de 2015 (rumo do vento: estação de Gago Coutinho; concentrações: estação dos Olivais).

Resumindo, as maiores concentrações para ambos os poluentes e em ambas as estações de monitorização dão-se a velocidades de vento mais reduzidas, como seria de esperar, sendo que menores velocidades do vento não ajudam na dispersão dos poluentes, favorecendo a sua acumulação. Para além disso, verificou-se também que as maiores concentrações se dão com direções do vento no quadrante Este. Este facto pode ser explicado devido às velocidades de vento mais baixas também se registarem para esta direção.

Tanto para o NO₂ como para as PM₁₀, as concentrações mais baixas registadas na Avenida da Liberdade dão-se maioritariamente quando a direção do vento é Sudoeste, o que também coincide com o rumo onde se registam as velocidades de vento mais elevadas. Na estação dos Olivais as menores velocidades estão associadas aos quadrantes Noroeste e Norte, coincidindo o Norte com o quadrante em que se registaram as segundas velocidades de vento mais elevadas.

Para além da altura da base da inversão térmica e da velocidade e direção do vento, também foi estudada a relação das excedências com a hora de ocaso do sol, através de tabelas de contingência. Analisaram-se as excedências que ocorreram às 17h, 18h e 19h com a hora do ocaso do sol variando entre as 17h-18h, 18h-19h e 19h-20h. No entanto, não foi observada uma relação de dependência entre as duas variáveis.

4.1.4 Efeito das excedências de curto prazo nas médias anuais

De modo a perceber o efeito das excedências aos valores limite horários e diários nas médias anuais do NO₂ e das PM₁₀, retiraram-se os valores superiores aos valores limite às respetivas médias. Na Figura 4.19, apresenta-se a evolução da concentração média anual de NO₂, entre 2010 e 2014, tendo sido retiradas as médias horárias superiores a 200 µg/m³.

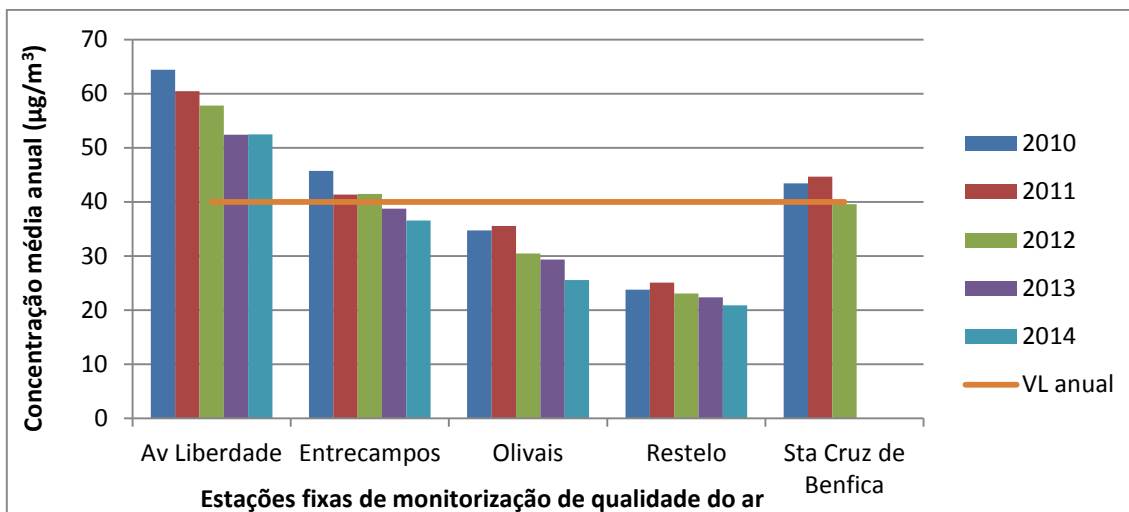


Figura 4.19 - Evolução da concentração média anual de NO₂ (2010 a 2014), sem as médias horárias superiores a 200 µg/m³.

É possível verificar que apesar da média anual ter diminuído ligeiramente, as médias anuais acima do limite legal permaneceram. Na Figura 4.20, apresenta-se a evolução da concentração média anual de NO₂ de 2010 a 2014, mas agora retirando os dias em que se identificou pelo menos um valor de média horária superior a 200 µg/m³.

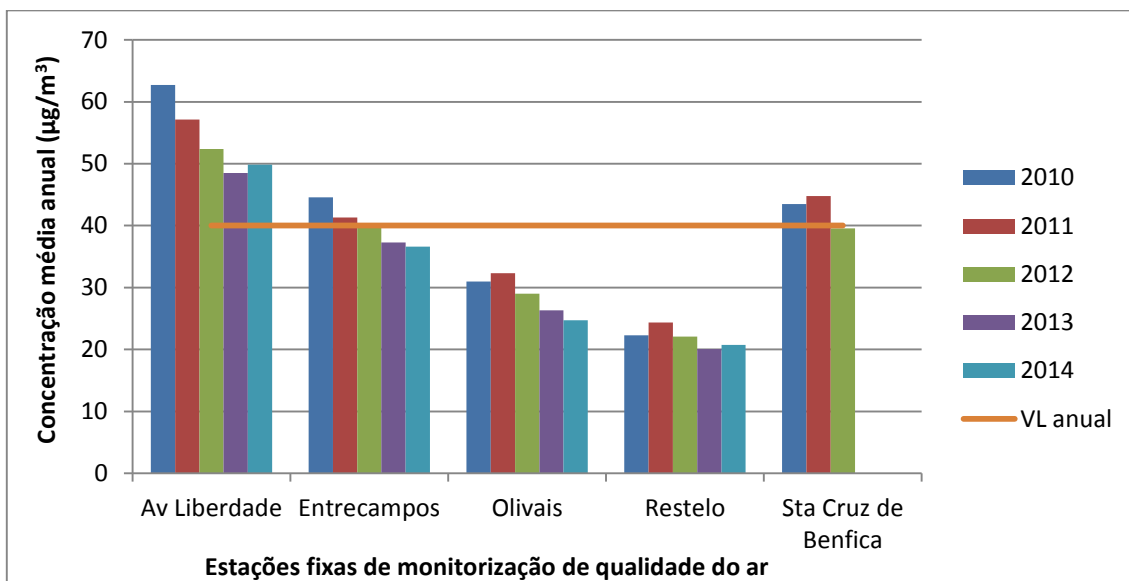


Figura 4.20 - Evolução da concentração média anual de NO₂ (2010 a 2014), sem os dias em que existiu pelo menos uma média horária superior a 200 µg/m³.

Comparando as Figuras 4.19 e 4.20, já se nota uma maior diferença na média anual. No entanto, os anos em incumprimento mantêm-se os mesmos, exceto 2012 em Entrecampos que fica no limite. Verifica-se que, mesmo retirando os dias com médias horárias superiores ao valor limite, ou seja, mesmo que se controlasse com medidas a curto prazo as médias horárias mais elevadas, não seria à partida possível corrigir significativamente a média anual.

Na Figura 4.21 está representada a evolução da concentração média anual de PM₁₀, mas com todas as médias horárias superiores a 50 µg/m³ retiradas. Verifica-se que as médias anuais desceram consideravelmente, deixando de existir estações em incumprimento legal.

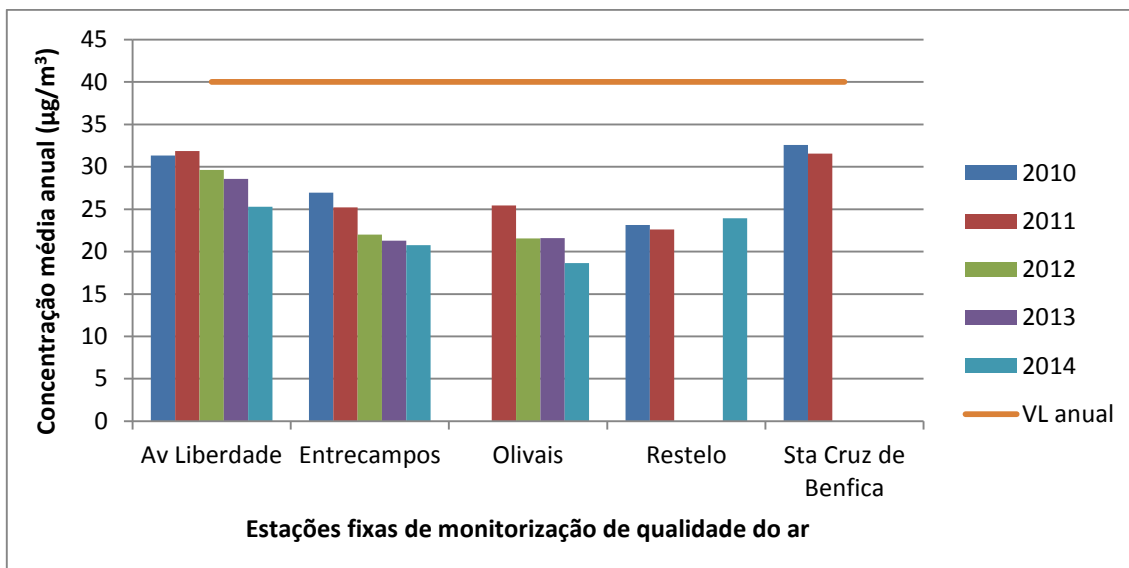


Figura 4.21 - Evolução da concentração média anual de PM₁₀ (2010 a 2014), sem médias horárias superiores a 50 µg/m³.

Na Figura 4.22, apresentam-se as concentrações médias anuais para as PM₁₀, mas agora tendo sido retiradas as médias diárias superiores a 50 µg/m³. Verifica-se novamente uma diminuição das médias anuais e o cumprimento legal em todos os anos e em todas as estações.

Comparando com a Figura 4.21, o controlo das médias horárias apresentaria um maior efeito na redução das médias anuais. No caso das PM₁₀, medidas com vista a controlar as ultrapassagens ao valor limite diário iriam influenciar positivamente a média anual.

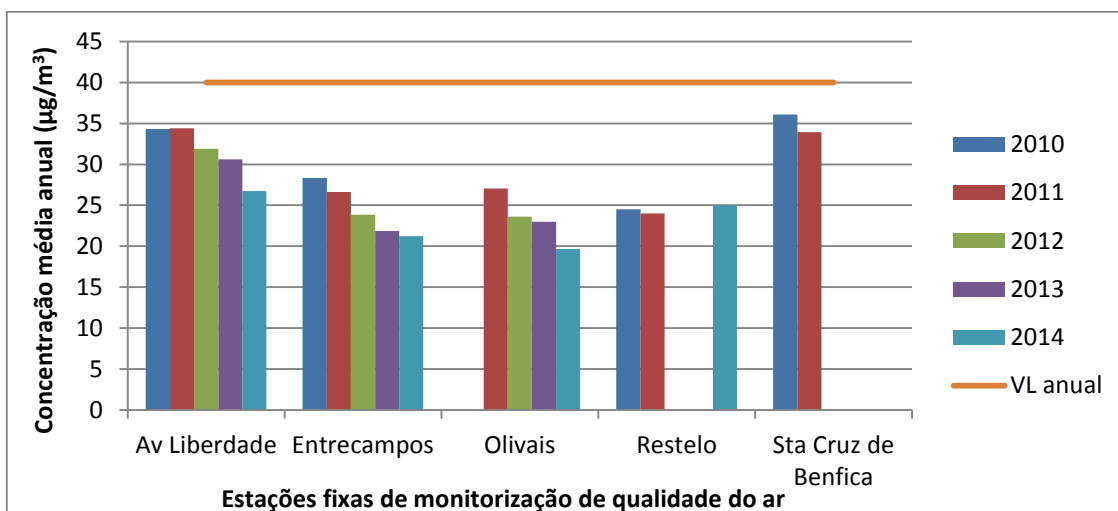


Figura 4.22 - Evolução da concentração média anual de PM₁₀ (2010 a 2014), sem médias diárias superiores a 50 µg/m³.

Para a Avenida da Liberdade foram comparadas as várias opções, como se apresenta na Figura 4.23. É possível perceber que a maior redução na concentração média anual de NO₂ se dá ao serem retirados todos os valores de um dia em que existiu pelo menos uma ultrapassagem a 200 µg/m³. Ainda na Avenida da Liberdade, no caso das PM₁₀ (Figura 4.24), a maior redução na concentração média anual observa-se quando são retirados os valores horários superiores a 50 µg/m³.

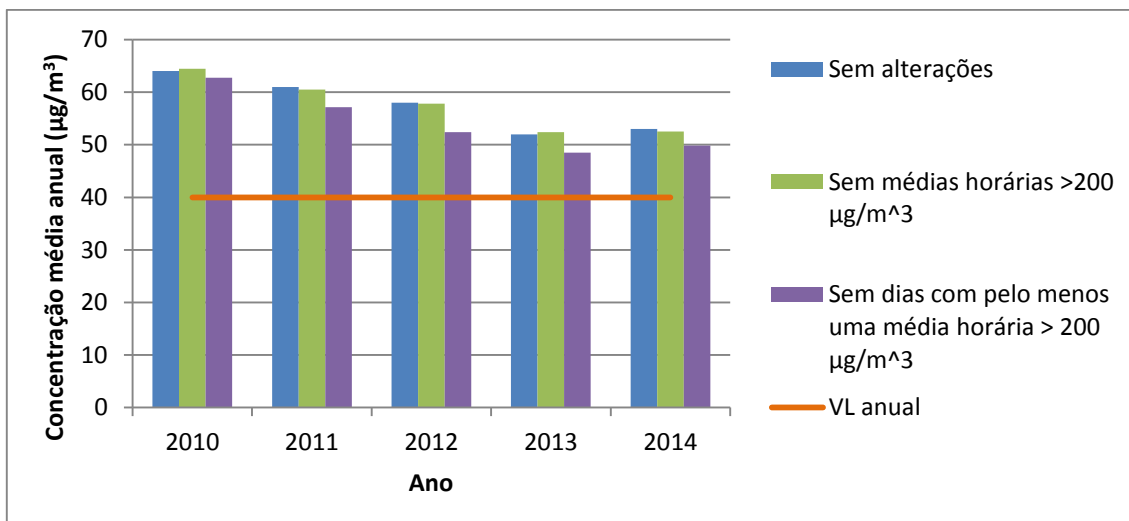


Figura 4.23 - Comparação da evolução da concentração média anual de NO₂ (2010 a 2014), sem alterações e retiradas as excedências, para a Avenida da Liberdade.

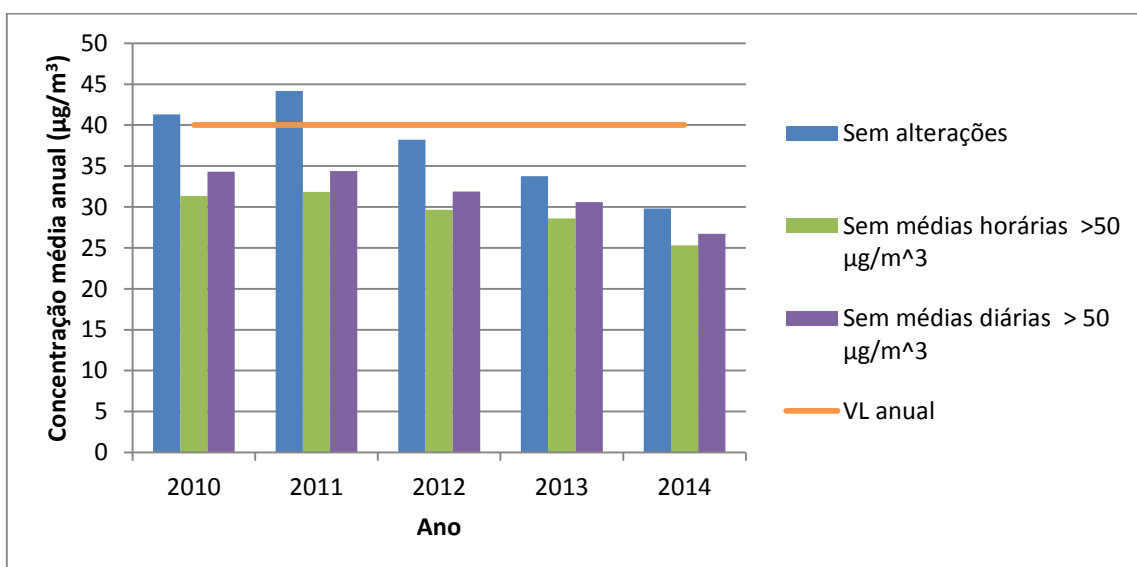


Figura 4.24 - Comparação da evolução da concentração média anual de PM₁₀ (2010 a 2014), sem alterações e retiradas as excedências, para a Avenida da Liberdade.

Resumindo, no caso das PM₁₀, medidas mais pontuais que controlassem a média diária ou horária em alturas com condições meteorológicas favoráveis à acumulação dos poluentes ou numa altura em que já se registassem várias ultrapassagens, podiam ajudar no controlo da média anual. Como exemplo, tudo indica que restrições de curta duração aplicadas à circulação automóvel em zonas críticas da cidade, como a Avenida da Liberdade, teriam um efeito positivo e talvez até determinante em termos de cumprimento da legislação.

4.2 Avaliação do impacto da ZER na qualidade do ar

4.2.1 Caracterização de excedências antes e depois da fase II da ZER

No que respeita à avaliação das excedências antes e depois da fase II da ZER, foram analisadas novamente as ultrapassagens aos valores limite de curto prazo, mas desta vez com o objetivo de caracterizar e identificar possíveis alterações no número e perfil das excedências, antes e depois da entrada em vigor da fase II da ZER. A análise dividiu-se então no período de

janeiro de 2010 a 31 de março de 2012 – antes da fase II - e no período de 1 de abril de 2012 (entrada em vigor da fase II) a janeiro de 2015 - depois da fase II.

Na Tabela 4.12, encontram-se o número de excedências para os dois poluentes em análise e para as várias estações, antes e depois da fase II. É possível observar que a grande maioria das excedências aos valores limite para o NO₂ e para as PM₁₀ se deu antes da segunda fase da ZER, sendo este período mais curto comparativamente ao depois da implementação da fase II.

No caso da Avenida da Liberdade, verifica-se uma diminuição de 8% no caso do NO₂ e de 48% no caso das PM₁₀. Em Entrecampos verifica-se uma diminuição de 76% e 61%, respetivamente. Visto que esta estação se encontra na zona 2, seria de esperar uma maior diminuição na Avenida da Liberdade, pois as restrições são mais exigentes na zona 1.

Para o NO₂, nas estações dos Olivais, Restelo e Santa Cruz de Benfica, as excedências ao valor limite registaram-se todas antes da fase II. Posto isto, não serão caracterizadas novamente as ultrapassagens identificas nestas estações (visto já ter sido feito na secção 4.1.3 desta dissertação). O que se pode retirar desta análise, é que depois da fase II implementada não se registaram mais excedências nestas três estações, o que pode indicar que a ZER também tem efeito fora dos seus limites ou que a qualidade do ar melhorou pela influência de outros fatores, nomeadamente meteorológicos e/ou económicos.

Tabela 4.12 – Número de excedências ao valor limite antes e depois da fase II da ZER para o NO₂ e PM₁₀ e para todas as estações.

	Nº excedências ao VL			
	Antes Fase II		Depois Fase II	
	NO ₂	PM ₁₀	NO ₂	PM ₁₀
Avenida da Liberdade	62	238	57	124
Entrecampos	18	72	7	17
Olivais	35	47	0	11
Restelo	2	40	0	12
Santa Cruz de Benfica	7	199	0	3

Para o NO₂ foram estudados os valores superiores a 200 µg/m³. Inicialmente foi calculada a percentagem de excedências ao valor limite em cada mês. Os valores para as estações da Avenida da Liberdade e de Entrecampos encontram-se na Tabela 4.13 (os meses mais representativos encontram-se a vermelho).

Tabela 4.13 – Percentagem de excedências ao valor limite horário para o NO₂ por mês, antes e depois da fase II da ZER, para Avenida da Liberdade e Entrecampos.

	% Excedências ao VL horário			
	Avenida da Liberdade		Entrecampos	
Mês	Antes Fase II	Depois Fase II	Antes Fase II	Depois Fase II
Janeiro	5	24	6	0
Fevereiro	10	0	6	0
Março	6	2	6	0
Abril	0	0	0	0
Maio	0	0	0	0
Junho	0	9	0	0
Julho	8	2	0	0
Agosto	8	0	0	0
Setembro	3	7	0	0
Outubro	52	24	16	29
Novembro	8	14	60	57
Dezembro	0	18	6	14
Total	100	100	100	100

Na estação da Avenida da Liberdade (resultados destacados na Figura 4.25) verifica-se que a maior percentagem de ultrapassagens se dá no outono, tanto no período antes da fase II como no período depois. No entanto, o mês mais significativo é outubro antes da fase II da ZER e depois da sua implementação outubro e janeiro apresentam a mesma percentagem de excedências. Para Entrecampos a estação mais significativa também é o outono, mas neste caso o mês com maior excedências é novembro, em ambos os períodos. Não se verificam então grandes alterações entre o antes e depois da fase II relativamente ao mês onde ocorreram a maioria das excedências.

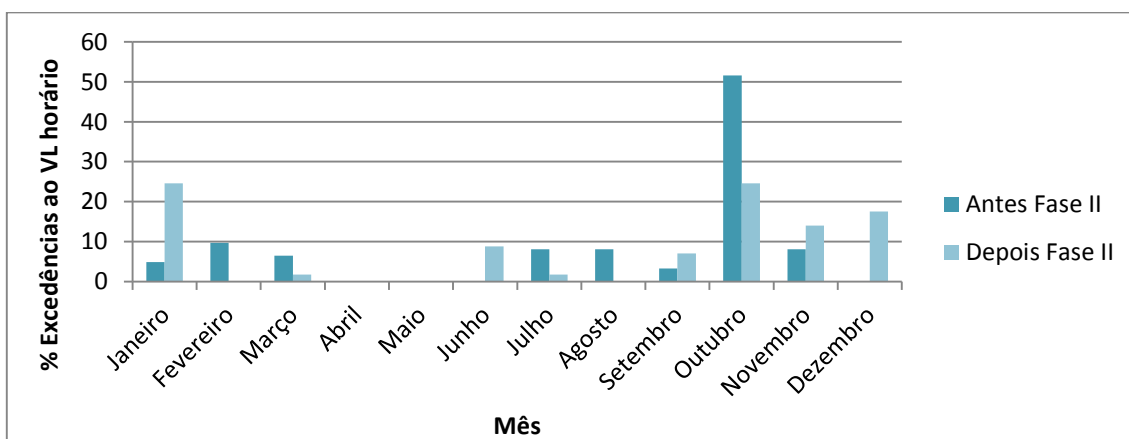


Figura 4.25 – Percentagem de excedências ao valor limite horário por mês para o NO₂, antes e depois da fase II da ZER, para a Avenida da Liberdade.

Posteriormente analisaram-se as percentagens de excedências por dia da semana. Os resultados apresentam-se na Tabela 4.14, com os dias mais representativos sublinhados a vermelho. Em todas as estações, tanto antes da fase II como depois da sua implementação, a maioria das excedências registou-se em dias úteis, devido ao tráfego mais intenso durante a semana.

Na Avenida da Liberdade, antes da fase II, a maioria dos valores registou-se à sexta-feira. Depois da fase II implementada, o dia com mais excedências é segunda-feira. Já em Entrecampos, verifica-se uma maior dispersão pelos dias da semana antes da fase II (em que segunda-feira é o dia mais representativo), sendo que depois da fase II entrar em vigor a maioria das ultrapassagens registou-se à quarta-feira. Neste caso também não se verifica nenhum padrão na alteração antes e depois da fase II.

Tabela 4.14 – Percentagem de excedências ao valor limite horário para o NO₂ por dia da semana, antes e depois da fase II da ZER, para a Avenida da Liberdade e Entrecampos.

Dia da Semana	% Excedências ao VL horário			
	Avenida da Liberdade		Entrecampos	
	Antes Fase II	Depois Fase II	Antes Fase II	Depois Fase II
Domingo	3	9	0	0
Segunda-feira	11	23	33	14
Terça-feira	15	14	22	0
Quarta-feira	11	16	17	72
Quinta-feira	15	21	22	14
Sexta-feira	30	5	6	0
Sábado	15	12	0	0
Total	100	100	100	100

Por último, foram analisadas as percentagens de excedências por hora do dia (Tabela 4.15). Na Avenida da Liberdade, a maior percentagem de valores registou-se às 19h, em ambos os períodos. Antes da fase II a maioria (46%) registou-se entre as 18h e as 19h e depois da fase II, as excedências concentraram-se ainda mais entre as 18h e as 19h (59%).

Em Entrecampos a maioria das excedências registou-se às 8h (37%), sendo que 48% das excedências se registarem entre as 8h e as 9h, antes da fase II. Depois da fase II o maior registo (ainda que só duas excedências) também se registou às 8h.

Não existem assim grandes alterações entre o período antes e depois da implementação da fase II. As horas referidas (18h-19h e 8h-9h) são, normalmente, onde se dá as maiores concentrações devido aos picos de tráfego.

Tabela 4.15 – Percentagem de excedências ao valor limite horário para o NO₂ por hora do dia, antes e depois da fase II da ZER, para a Avenida da Liberdade e Entrecampos.

Hora	% Excedências ao VL horário			
	Avenida da Liberdade		Entrecampos	
	Antes Fase II	Depois Fase II	Antes Fase II	Depois Fase II
00:00	10	2	6	0
01:00	3	3	0	0
02:00	3	2	0	0
03:00	2	0	0	0
04:00	0	0	0	0
05:00	0	0	0	0
06:00	0	0	0	0
07:00	0	0	0	0

Tabela 4.15 (cont.) – Percentagem de excedências ao valor limite horário para o NO₂ por hora do dia, antes e depois da fase II da ZER, para a Avenida da Liberdade e Entrecampos.

	% Excedências ao VL horário			
	Avenida da Liberdade		Entrecampos	
Hora	Antes Fase II	Depois Fase II	Antes Fase II	Depois Fase II
08:00	0	0	37	30
09:00	0	0	11	14
10:00	0	0	6	0
11:00	0	0	0	0
12:00	0	0	0	0
13:00	0	0	0	0
14:00	0	0	0	0
15:00	0	0	0	0
16:00	0	2	0	0
17:00	3	9	0	0
18:00	16	28	0	0
19:00	30	31	6	14
20:00	8	16	11	14
21:00	10	5	6	14
22:00	5	0	11	14
23:00	10	2	6	0
Total	100	100	100	100

Para além desta análise, estudou-se ainda o número de dias consecutivos em que ocorreu pelo menos uma ultrapassagem ao valor limite horário para o NO₂ e respetiva frequência com que aconteceram, antes e depois da fase II implementada (Tabela 4.16). Esta análise foi feita apenas para a Avenida da Liberdade e Entrecampos, visto não se terem registado valores de NO₂ depois da fase II para as restantes estações.

Verifica-se para a estação da Avenida da Liberdade que, depois da fase II, não se registaram excedências de NO₂ seguidas em mais de quatro dias, tendo-se registado pelo menos uma excedência ao valor limite horário por dia em sete dias consecutivos, antes da fase II. Em Entrecampos não existem ultrapassagens em dias seguidos depois da fase II, contrariamente ao que se sucede antes de esta ser implementada.

Tabela 4.16 – Número de dias consecutivos em que se registou pelo menos uma excedência ao valor limite horário para o NO₂ e frequência com que aconteceram, para a Avenida da Liberdade e Entrecampos.

Nº de dias consecutivos	Frequência			
	Avenida da Liberdade		Entrecampos	
	Antes Fase II	Depois Fase II	Antes Fase II	Depois Fase II
1	12	19	5	4
2	6	5	3	0
3	0	0	0	0
4	0	1	0	0
5	0	0	0	0
6	0	0	0	0
7	1	0	0	0

Relativamente às PM₁₀, foram analisados os valores superiores a 50 µg/m³. Os resultados para a análise das percentagens de excedências por mês encontram-se na Tabela 4.17 (valores mais representativos a vermelho) para as todas as estações. Na Figura 4.26 encontram-se representados os resultados para a Avenida da Liberdade.

Tal como para o NO₂, a maior percentagem de excedências registou-se no outono e inverno para ambas as fases em todas as estações. Novamente o mais representativo na Avenida da Liberdade foi outubro, antes da fase II da ZER e outubro e janeiro depois da fase II ser implementada.

Tabela 4.17 - Percentagem de excedências ao valor limite diário para as PM₁₀ por mês, antes e depois da fase II da ZER, para Avenida da Liberdade, Entrecampos, Olivais, Restelo e Santa Cruz de Benfica.

Mês	% Excedências ao VL diário									
	Avenida da Liberdade		Entrecampos		Olivais		Restelo		Sta Cruz de Benfica	
	Antes Fase II	Depois Fase II	Antes Fase II	Depois Fase II	Antes Fase II	Depois Fase II	Antes Fase II	Depois Fase II	Antes Fase II	Depois Fase II
Janeiro	10	15	11	18	15	18	18	34	14	0
Fevereiro	11	1	17	0	15	0	10	0	17	0
Março	10	4	11	0	8	0	13	8	8	0
Abril	7	5	4	0	11	0	8	0	6	0
Mai	10	7	1	6	2	0	0	0	3	0
Junho	9	7	4	18	4	9	5	0	4	0
Julho	7	6	8	0	0	0	2	0	4	0
Agosto	8	7	7	0	0	28	10	8	6	0
Setembro	5	11	6	0	2	18	2	0	2	0
Outubro	12	15	22	34	32	18	20	34	14	0
Novembro	7	8	6	6	11	0	10	8	12	0
Dezembro	4	14	3	18	0	9	2	8	10	100
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

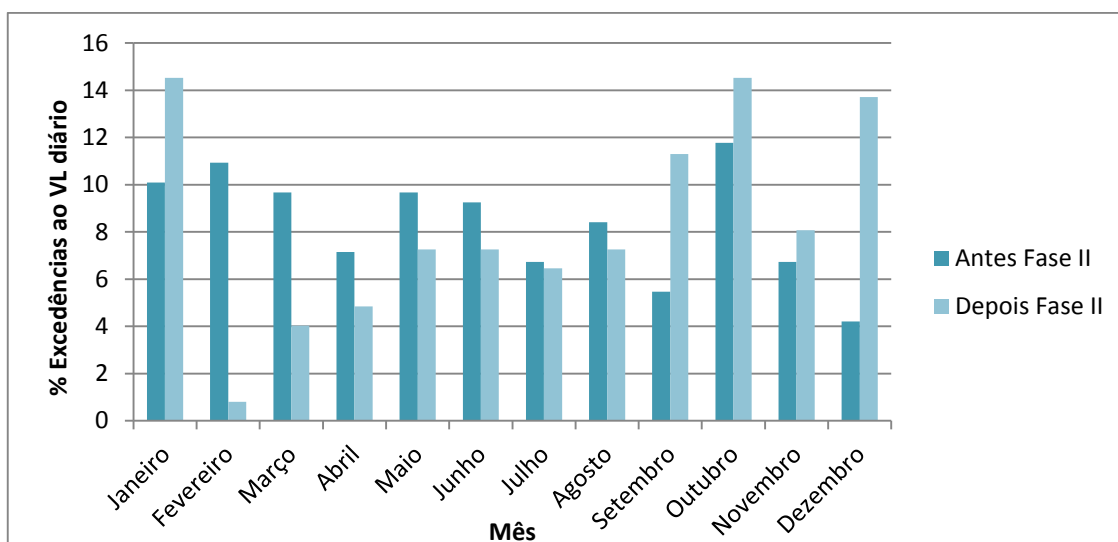


Figura 4.26 - Percentagem de excedências ao valor limite diário por mês para as PM₁₀, antes e depois da fase II da ZER, para a Avenida da Liberdade.

De seguida foram analisadas as percentagens de excedências por dia da semana (Tabela 4.18 com os dias mais representativos sublinhados a vermelho). Tal como para o NO₂, a maioria das ultrapassagens registou-se em dias úteis tanto antes da fase II como depois da sua implementação.

Relativamente ao dia da semana, este vai alterando de período para período e de estação para estação. Não se verifica um padrão relevante, tendo talvez passado a ser a segunda-feira o dia da semana com mais excedências depois da fase II no geral das estações, deixando de ser dias a meio da semana.

Tabela 4.18 - Percentagem de excedências ao valor limite diário para as PM₁₀ por dia da semana, antes e depois da fase II da ZER, para a Avenida da Liberdade, Entrecampos, Olivais, Restelo e Santa Cruz de Benfica.

	% Excedências ao VL diário									
	Avenida da Liberdade		Entrecampos		Olivais		Restelo		Sta Cruz de Benfica	
Dia da Semana	Antes Fase II	Depois Fase II	Antes Fase II	Depois Fase II	Antes Fase II	Depois Fase II	Antes Fase II	Depois Fase II	Antes Fase II	Depois Fase II
Domingo	8	10	11	12	6	18	8	25	13	0
Segunda-feira	10	16	11	29	11	10	15	34	18	0
Terça-feira	15	12	10	23	9	18	12	17	17	0
Quarta-feira	17	18	19	18	21	27	20	8	21	33
Quinta-feira	17	19	18	6	21	0	15	8	19	33
Sexta-feira	19	15	18	12	15	27	18	8	12	33
Sábado	14	10	1	0	17	0	12	0	0	0
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Repetiu-se também para as PM₁₀ a análise do número de dias consecutivos em que ocorreram ultrapassagens ao valor limite de curto prazo e respetiva frequência, antes e depois da fase II implementada (Tabela 4.19). Na Avenida da Liberdade verifica-se no geral uma diminuição na duração dos excedências consecutivos depois da fase II ser implementada, tal como para as

restantes estações. No entanto, em Santa Cruz de Benfica deve ser tido em consideração que a estação não tem dados disponíveis em 2014 e 2015. Para além das emissões em causa, as variáveis meteorológicas deverão desempenhar um papel crucial na duração de alguns episódios de poluição mais intensos, pelo que esta relação será investigada num subcapítulo já em seguida.

Tabela 4.19 - Número de dias consecutivos em que se registaram excedências ao valor limite diário para as PM₁₀ e frequência com que aconteceram, para todas as estações analisadas.

Nº de dias consecutivos	Frequência									
	Avenida da Liberdade		Entrecampos		Olivais		Restelo		Sta Cruz de Benfica	
	Antes Fase II	Depois Fase II	Antes Fase II	Depois Fase II	Antes Fase II	Depois Fase II	Antes Fase II	Depois Fase II	Antes Fase II	Depois Fase II
1	37	24	20	8	12	9	13	7	44	0
2	23	16	11	3	8	1	3	1	14	0
3	11	8	4	1	2	0	3	1	14	1
4	8	3	3	0	2	0	3	0	6	0
5	6	1	0	0	1	0	0	0	1	0
6	3	1	1	0	0	0	0	0	2	0
7	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0
9	3	1	0	0	0	0	0	0	2	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0

4.2.2 Caracterização das excedências em comum aos poluentes NO₂ e PM₁₀

Um aspeto relevante é perceber a relação entre as ultrapassagens aos valores limite de NO₂ e PM₁₀, antes da implementação da fase II da ZER e depois sua entrada em vigor. Esta análise teve como objetivo caracterizar os episódios em comum para cada estação, bem como perceber se alteraram depois da fase II.

Compararam-se as excedências de ambos os poluentes por estação e por período, de modo a ser possível identificar os dias em que existiram ultrapassagens simultâneas para cada local. Considerou-se que bastaria existir uma ultrapassagem ao valor limite horário para o NO₂ no mesmo dia em que uma ultrapassagem do valor limite diário para as PM₁₀.

O número de excedências em comum e respetivas percentagens encontram-se na Tabela 4.20. É possível verificar que para a Avenida da Liberdade em 79% dos dias em que se registaram ultrapassagens de NO₂ também ocorreram excedências ao valor limite para as PM₁₀. No período posterior à implementação da fase II esse valor passou para 64%. O mesmo se observa para Entrecampos com 50% e 25% (antes da fase II e depois, respetivamente) dos dias com excedências de NO₂ a verificarem também ultrapassagens de PM₁₀.

Na estação dos Olivais, antes da fase II, em 44% dos dias com ultrapassagens de NO₂ também se registaram ultrapassagens de PM₁₀. No Restelo, apesar de só existir apenas um dia com ultrapassagens de NO₂, esse coincidiu com ultrapassagem de PM₁₀. Em Santa Cruz de

Benfica, existiram apenas cinco dias com ultrapassagens de NO₂ mas também todos coincidiram com ultrapassagens de PM₁₀.

Depois de implementada a fase II não se registaram ultrapassagens de NO₂ na estação dos Olivais, Restelo e Santa Cruz de Benfica. Verifica-se assim uma diminuição geral da diminuição das excedências em comum aos dois poluentes depois da fase II ser implementada.

Tabela 4.20 – Número de dias e percentagens relativas às ultrapassagens em comum entre o NO₂ e as PM₁₀ para todas as estações.

	Avenida da Liberdade		Entrecampos		Olivais	Restelo	Sta Cruz de Benfica
N ^a dias	Antes Fase II	Depois Fase II	Antes Fase II	Depois Fase II	Antes Fase II	Antes Fase II	Antes Fase II
Comuns	23	21	6	1	8	1	5
C/ pelo menos uma ultrapassagem NO ₂	29	33	12	4	18	1	5
C/ ultrapassagem PM ₁₀	228	124	72	11	47	40	199
% NO ₂ c/ ultrapassagem PM ₁₀	79	64	50	25	44	100	100
% PM ₁₀ c/ ultrapassagem NO ₂	10	17	8	6	17	3	3

Caracterizando agora as ultrapassagens em comum, na Avenida da Liberdade a maioria registou-se em outubro (52% antes da fase II e 33% depois), tal como para os restantes valores desta estação. Quanto ao dia da semana, os episódios em comum registaram-se maioritariamente nos dias úteis, destacando-se a quarta-feira e sexta-feira (ambos os dias com 22%) antes da fase II e a quinta-feira (29%) depois.

Para Entrecampos, metade dos seis dias com ultrapassagens em comum antes da implementação da fase II também se registaram em outubro, tal como o único dia em comum depois da fase II. Os dias da semana mais significativos foram quarta-feira e quinta-feira, cada um com 33% dos dias com excedências em comum antes da fase II. O único dia com excedências em comum aos dois poluentes depois da fase II registou-se quarta-feira. Tendo em conta estes resultados, não se verificam diferenças significativas relativamente às restantes excedências de NO₂ e PM₁₀ e entre o período antes e depois da fase II da ZER.

4.2.3 Análise de episódios relevantes e em comum aos poluentes NO₂ e PM₁₀

Um dos aspetos considerado pertinente na investigação realizada foi a avaliação detalhada de episódios de poluição do ar que permitam compreender melhor as circunstâncias em termos de emissão, dispersão e qualidade do ar que conduziram a elevadas concentrações durante períodos de tempo elevados (vários dias). Assim, analisaram-se os episódios mais longos, em comum aos dois poluentes (NO₂ e PM₁₀), verificados na Avenida da Liberdade. Foi analisado um episódio de sete dias que ocorreu antes da implementação da fase II e um de quatro dias que ocorreu depois da entrada em vigor desta fase.

Verificou-se um episódio de sete dias entre 11 e 17 de outubro de 2011, com 26% das ocorrências de NO₂ às 19h e 48% entre as 19h e as 21h. Nestes dias, a altura da base da inversão térmica esteve inferior à média identificada para os dias com ultrapassagens (tanto para o NO₂ (462 metros) como para as PM₁₀ (770 metros)), variando entre os 188 e os 250 metros. Também a intensidade média do vento foi baixa, variando entre os 1,4 e os

2,2 m.s⁻¹. Relativamente à direção do vento esta é maioritariamente Nordeste (71% dos dias), sendo esta a segunda direção associada a maiores concentrações.

Comparando com as outras estações, em Entrecampos não se registaram ultrapassagens em comum aos dois poluentes nestes dias, mas registaram-se excedências de PM₁₀ de dia 12 a 17. Na estação de Olivais registaram ultrapassagens em comum no dia 12, sendo que as PM₁₀ tiveram excedências de 12 a 15 e também dia 17. Restelo também tem em comum para dia 12, com as PM₁₀ a excederem o valor limite dia 12, 13, 14 e 17. Santa Cruz de Benfica não tem ultrapassagens em comum mas as PM₁₀ registaram excedências de 11 a 17.

O episódio de quatro dias registou-se de 20 a 23 de outubro de 2014. Dos valores de NO₂, 40% ocorreram às 19h e 80% entre as 18h e as 20h. Tal como no episódio de sete dias, a altura da base da inversão térmica foi inferior para a média das excedências para ambos os poluentes, tendo variado de 166 a 266 metros, sendo mais uma razão para a ocorrência das ultrapassagens em comum. Já a intensidade média do vento foi um pouco mais elevada neste caso, variando entre os 2,3 e os 3,7 m.s⁻¹. O rumo do vento foi sempre Nordeste.

Nas restantes estações fixas de monitorização, em Entrecampos também se registou excedências em comum dia 22, sendo a única ultrapassagem em comum para esta estação depois da fase II ter entrado em vigor (NO₂ só tem mesmo duas ultrapassagens dia 22 e as PM₁₀ tem dia 20, 21 e 22). Nos Olivais não há excedências ao NO₂ depois da fase II, sendo que as PM₁₀ tiveram para dia 21 e 22. Restelo também não têm de NO₂ mas de PM₁₀ tem de dia 20 a 22. Para Santa Cruz de Benfica não existem ultrapassagens coincidentes.

Resumindo, mesmo não sendo possível uma relação clara com o papel da ZER, o maior episódio identificado antes da fase II e durante o período de estudo teve a duração de sete dias, enquanto, depois da fase II implementada o maior episódio durou quatro dias. Destaca-se também mais uma vez o mês de outubro como o mais crítico, bem como o facto de os picos de concentração se verificarem pelas 19h, coincidente com maiores emissões de tráfego. Para além disso verifica-se uma relação já descrita com uma baixa altura da camada de mistura, para além da influência de baixas velocidades do vento.

4.3 Avaliação do impacte da ZER em termos de emissões

Um dos impactes mais diretos da ZER é a alteração da frota automóvel que circula nas diferentes zonas abrangidas, pelo que um dos objetivos deste estudo passou por comparar os veículos em termos de tipologia e normas Euro, antes e depois da fase III da ZER. Para além disso, também foram calculadas as emissões reduzidas pela fase III, na Avenida da Liberdade. Esta estimativa é um indicativo relevante, pois é deste modo que se pode estimar o impacte da fase III da ZER na qualidade do ar.

4.3.1 Análise da tipologia e tipo de combustível dos veículos

Nas campanhas de caracterização do tráfego realizadas em 2014 e 2015, foram recolhidos dados que permitiram analisar a percentagem de cada tipologia de veículos. Em 2014 foi identificada a tipologia de 24 162 veículos (1 037 na zona 1, 10 316 na zona 2 e 12 809 fora da ZER). Em 2015 foram objeto de recenseamento 37 117 veículos, de todas as tipologias (6 448 na zona 1, 17 931 na zona 2 e 12 738 fora da ZER). Na Figura 4.27 está representada a distribuição dos veículos por tipologias para 2014 e 2015 para toda a cidade de Lisboa.

É possível perceber que os veículos ligeiros de passageiros constituem a grande maioria dos veículos, seguindo-se os táxis, tanto em 2014 como 2015. Verifica-se ainda uma diminuição dos ligeiros de passageiros em 4% de 2014 para 2015 e um aumento dos táxis em 1%.

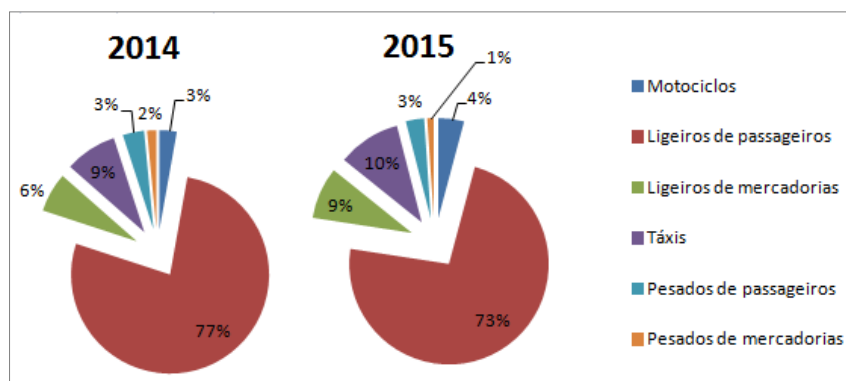


Figura 4.27 - Distribuição dos veículos por tipologias para a cidade de Lisboa, em 2014 e 2015.

Comparando agora a distribuição dos veículos por tipologia entre a zona 1 (Figura 4.28), zona 2 (Figura 4.29) e fora da ZER (Figura 4.30) verifica-se que a maioria dos veículos em cada zona continua a ser representada pelos ligeiros de passageiros. Os táxis continuam a ser os veículos com maior percentagem a seguir aos ligeiros de passageiros na zona 1 e na zona 2, sendo que fora da ZER são os ligeiros de mercadorias a segunda tipologia mais frequente. A zona 1 é ainda onde se verifica uma maior representatividade dos táxis, comparativamente às outras zonas.

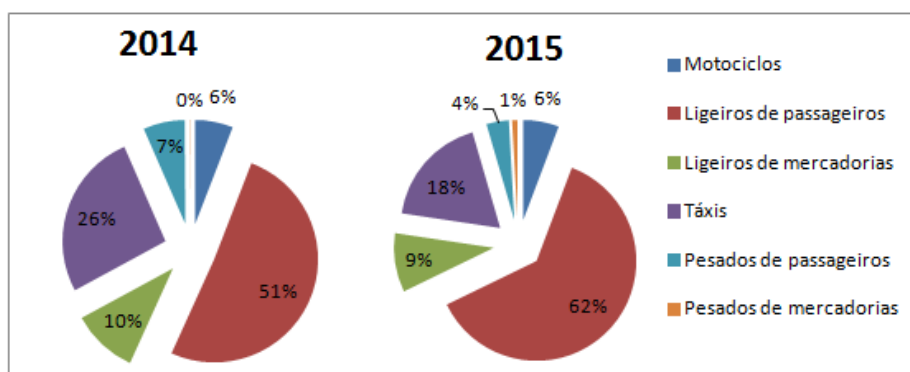


Figura 4.28 - Distribuição dos veículos por tipologias na zona 1 da ZER, em 2014 e 2015.

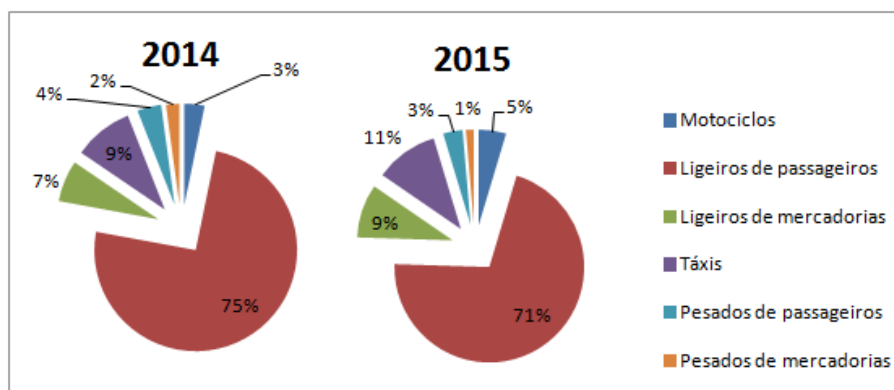


Figura 4.29 - Distribuição dos veículos por tipologias na zona 2 da ZER, em 2014 e 2015.

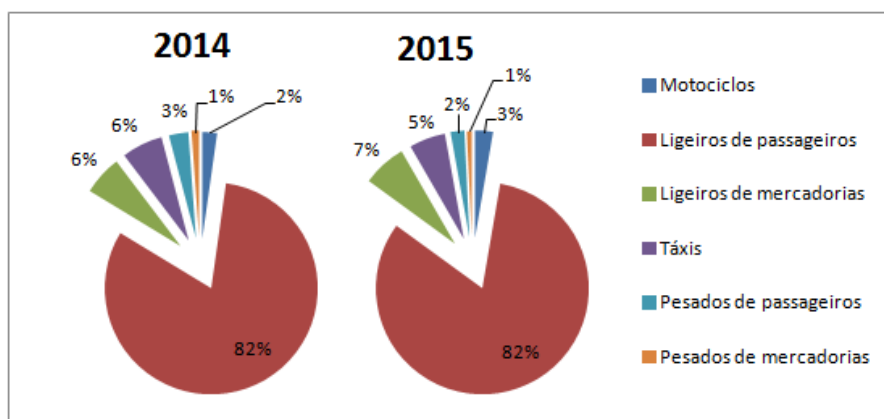


Figura 4.30 - Distribuição dos veículos por tipologias fora da ZER, em 2014 e 2015

Ainda nas campanhas de caracterização do tráfego, foram recolhidos dados relativamente ao tipo de combustível e cilindrada dos veículos ligeiros. Estes dados foram analisados com o objetivo principal de perceber a composição dos veículos ligeiros de passageiros e mercadorias para posteriormente calcular as respetivas emissões.

Na Figura 4.31 é possível observar que os veículos ligeiros de passageiros se dividem, quase a metade, entre gasolina e gasóleo, sendo a maioria a gasóleo com cilindrada inferior ou igual a 2,0 L nos dois anos. Apesar destes dados se aplicarem à cidade de Lisboa, verificou-se o mesmo para a Avenida da Liberdade (local para o qual se efetuaram os cálculos de emissões e a análise mais detalhada no âmbito da dissertação).

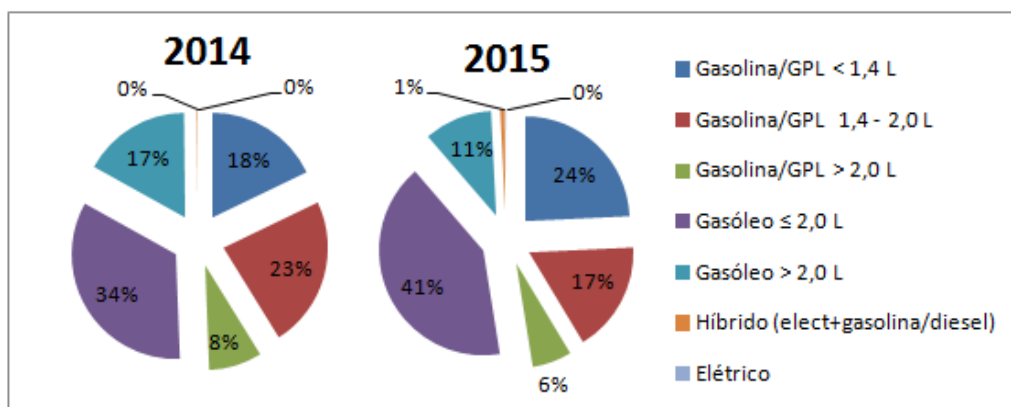


Figura 4.31 - Distribuição dos veículos ligeiros de passageiros por tipo de combustível e cilindrada na cidade de Lisboa, em 2014 e 2015.

Na Figura 4.32 encontra-se a distribuição dos veículos ligeiros de mercadorias por combustível e cilindrada. Verifica-se que a maioria destes veículos são a gasóleo com cilindrada inferior ou a igual a 2,0 L, sendo que neste caso representam mais de metade do total em ambos os anos.

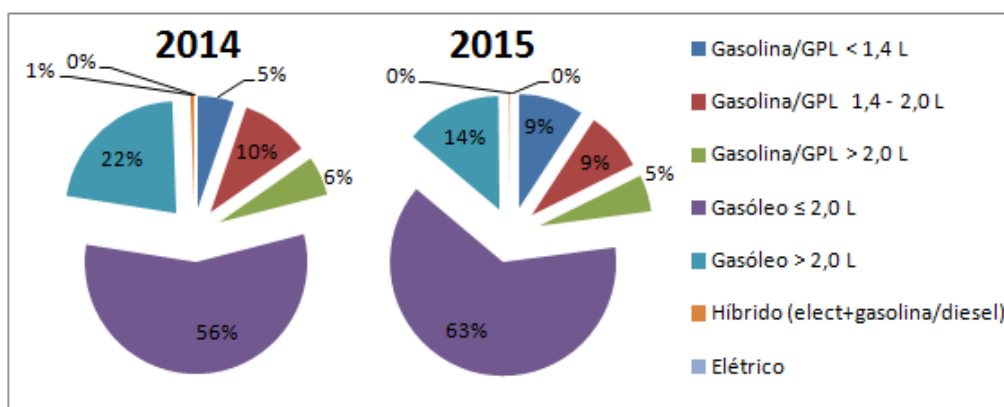


Figura 4.32 - Distribuição dos veículos ligeiros de mercadorias por tipo de combustível e cilindrada na cidade de Lisboa, em 2014 e 2015.

4.3.2 Análise de tipologia por norma EURO antes e depois da fase III da ZER

Com o objetivo de perceber se existiram alterações na composição das frotas automóveis e se as restrições da ZER estão a ser cumpridas, foram analisados os dados das campanhas de caracterização relativamente à norma Euro dos veículos. Para esta análise, em 2014, foi identificada a norma Euro de 5 716 veículos (400 na zona 1, 3 315 na zona 2 e 2 001 fora da ZER), não tendo sido feita a caracterização de motociclos. Em 2015 foi identificada a norma Euro de 14 830 veículos (2 224 na zona 1, 7 392 na zona 2 e 4 915 fora da ZER), sem considerar motociclos. Pela Figura 4.33 é possível perceber que, no geral da cidade de Lisboa, houve uma diminuição em todas as tipologias dos veículos com norma pré-Euro 1 de 2014 para 2015. O mesmo se verifica para os veículos com norma pré-Euro 2 e pré-Euro 3 (exceto nos táxis).

Relativamente a veículos com normas pós-Euro 4, observou-se igualmente um aumento transversal a todas as tipologias. Existe, no geral da cidade, uma melhoria da composição da frota automóvel, em parte decorrente da normal renovação da frota de veículos, e em parte possivelmente devido às imposições impostas pela ZER.

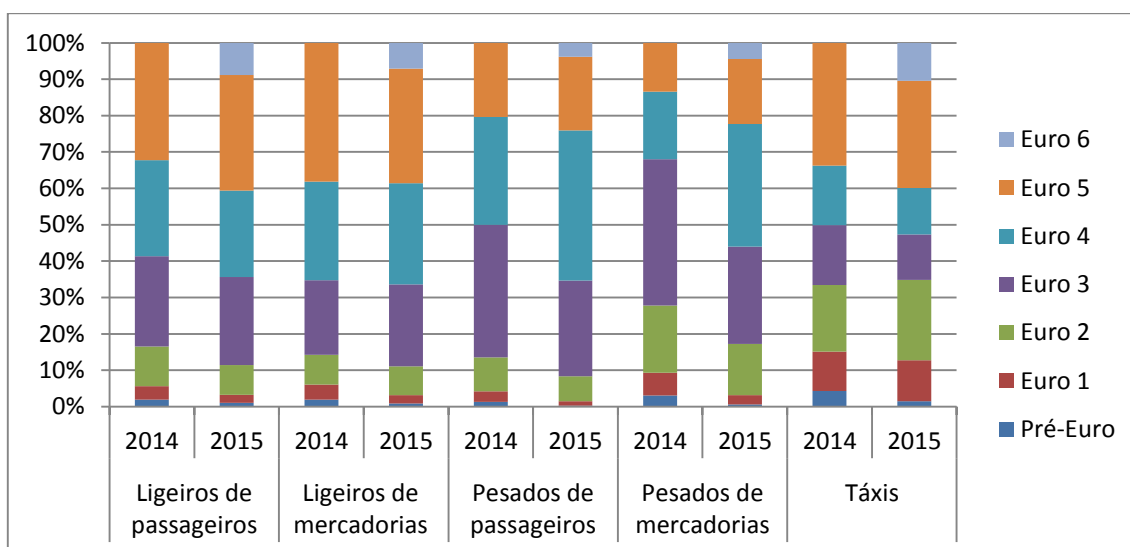


Figura 4.33 - Distribuição relativa de cada norma Euro por tipologia de veículos na cidade de Lisboa, em 2014 e 2015.

Na caracterização da zona 1 da ZER, foram utilizados todos os pontos de amostragem de 2015 pois todos abrangem a mesma área e as contagens foram feitas no mesmo sentido. Deste modo, é possível aumentar a representatividade estatística em 2015. No geral, a amostragem estatística é limitada nos dois anos, principalmente em 2014, o que pode limitar a robustez dos resultados para algumas classes de veículos menos frequentes. Um desses casos é o facto de não ter sido contabilizado nenhum pesado de mercadorias em 2014, na zona 1 (sendo a circulação de pesados de mercadorias limitada, em particular na zona 1). Para além disso, podem ter sido cometidos alguns erros nas contagens, nomeadamente ao ter existido alguma confusão na classificação de ligeiros de mercadorias, confundidos com ligeiros de passageiros.

Observa-se então na Figura 4.34 a variação da frota automóvel entre 2014 e 2015, para a zona 1. Nesta zona, verifica-se a existência de veículos pré-Euro 3 a circular em 2015, em todas as tipologias, contrariamente às imposições da ZER. Os veículos ligeiros de passageiros e os táxis são as únicas tipologias em que se observa um aumento dos veículos mais recentes (norma Euro 5 ou superior).

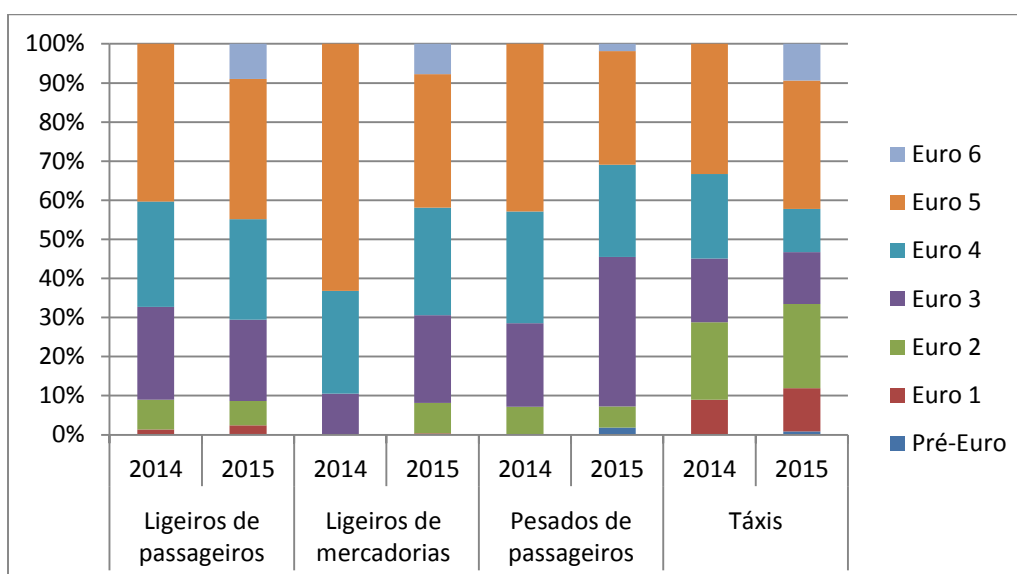


Figura 4.34 – Distribuição relativa de cada norma Euro por tipologia de veículos na zona 1 da ZER, em 2014 e 2015.

De forma a ser possível observar com mais detalhe estas alterações, apresenta-se na Figura 4.35 e na Figura 4.36, a alteração do peso dos veículos com norma pré-Euro 3 (em potencial incumprimento se não forem residentes) e o peso dos veículos com norma Euro 3 ou posterior (em cumprimento). Apenas são analisadas as tipologias com representatividade nos dois anos.

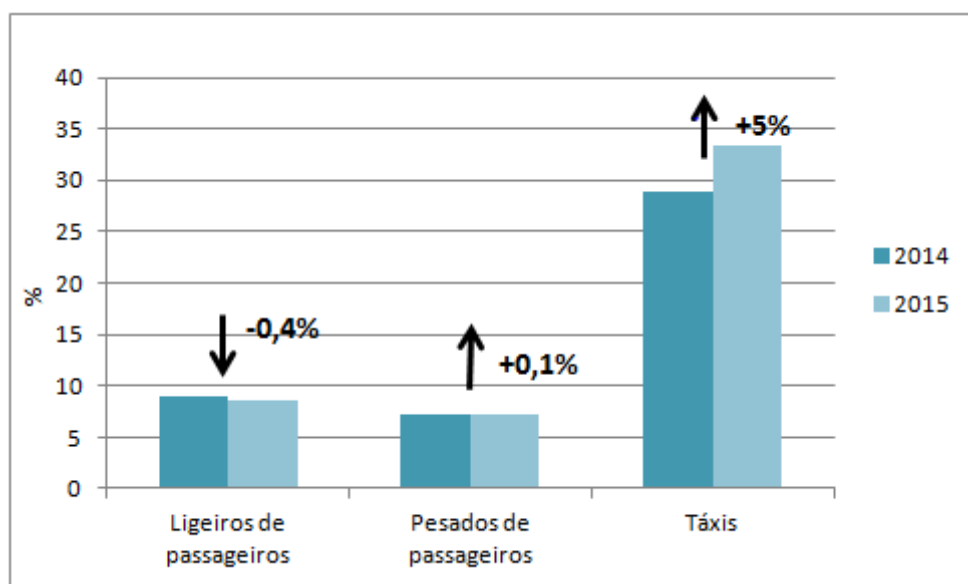


Figura 4.35 - Distribuição dos veículos pré-Euro 3 na zona 1 da ZER, em 2014 e 2015.

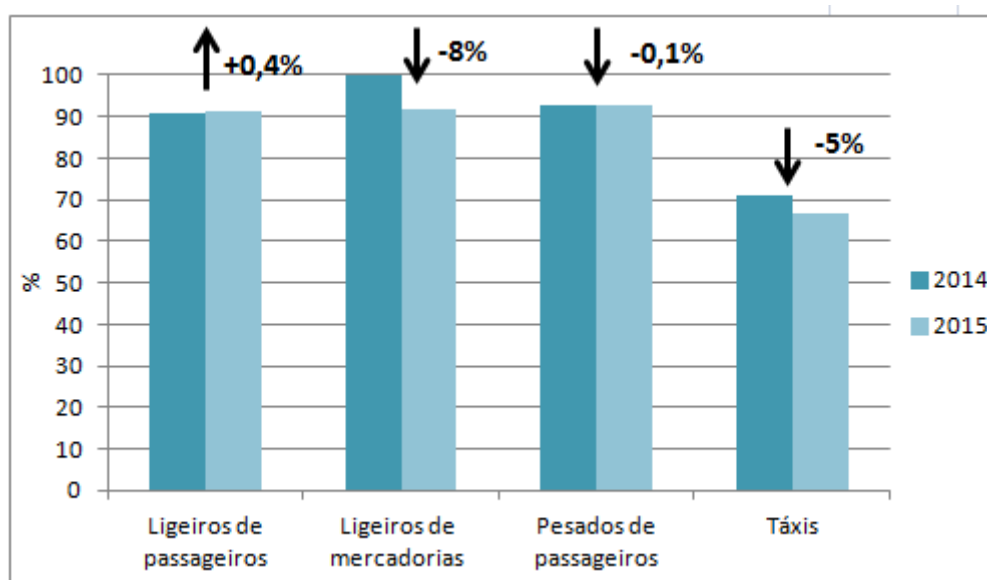


Figura 4.36 - Distribuição dos veículos Euro 3 e posteriores na zona 1 da ZER, em 2014 e 2015.

Estes resultados indicam novamente que as restrições não a ser totalmente cumpridas na zona 1, verificando-se uma melhoria muito ligeira nos ligeiros de passageiros que circulam nesta zona. Tal como já referido anteriormente, alguns dos veículos em incumprimento podem pertencer a residentes na zona 1 e por isso excecionados na ZER. No entanto, segundo um estudo realizado pelo DCEA-FCTL/UNL (2015), num total de 137 veículos, apenas 4% estavam registados em nome de residentes na zona 1 da ZER. Estes resultados podem também indicar que a forma e frequência de fiscalização do cumprimento da ZER são insuficientes, comprometendo o seu impacte. Para além disso, estes dados devem ser analisados com precaução, devido à fraca representatividade dos dados obtidos (principalmente em 2014) e ao facto da recolha ter sido feita de forma voluntária por alunos no âmbito de trabalhos académicos e sem uma elevada gestão de qualidade.

Na zona 2 (Figura 4.37) também é possível observar que existem veículos em incumprimento da fase III, ou seja, pré-Euro 2, em todas as tipologias. Verifica-se no entanto uma melhoria geral da frota que circula nesta zona.

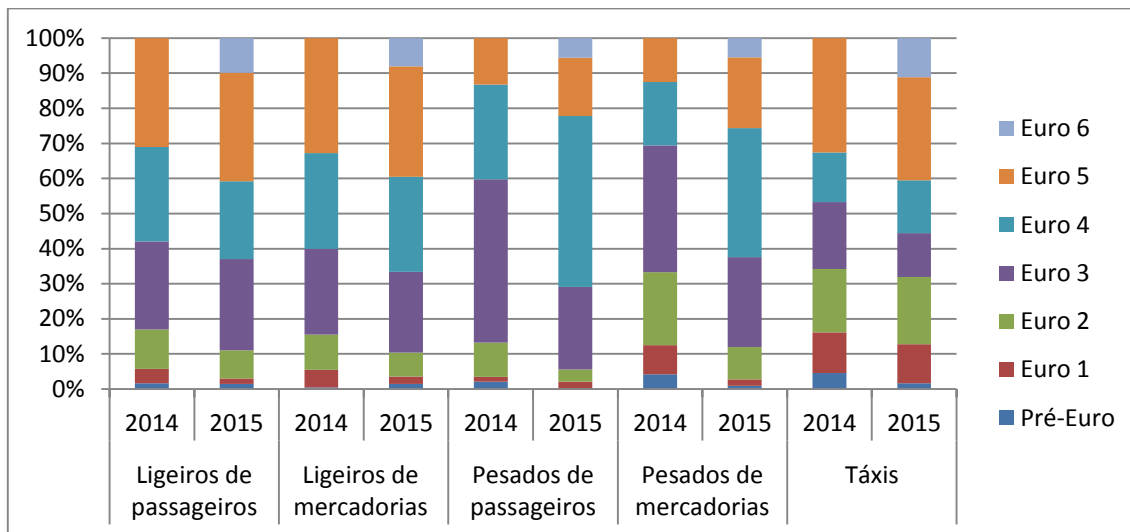


Figura 4.37 – Distribuição relativa de cada norma Euro por tipologia de veículos na zona 2 da ZER, em 2014 e 2015.

De modo a ser possível observar mais detalhadamente a alteração da frota na zona 2, apresenta-se o peso dos veículos em incumprimento, ou seja, com norma pré-Euro 2 (Figura 4.38) e o peso dos veículos em cumprimento, ou seja, com norma Euro 2 ou posterior (Figura 4.39).

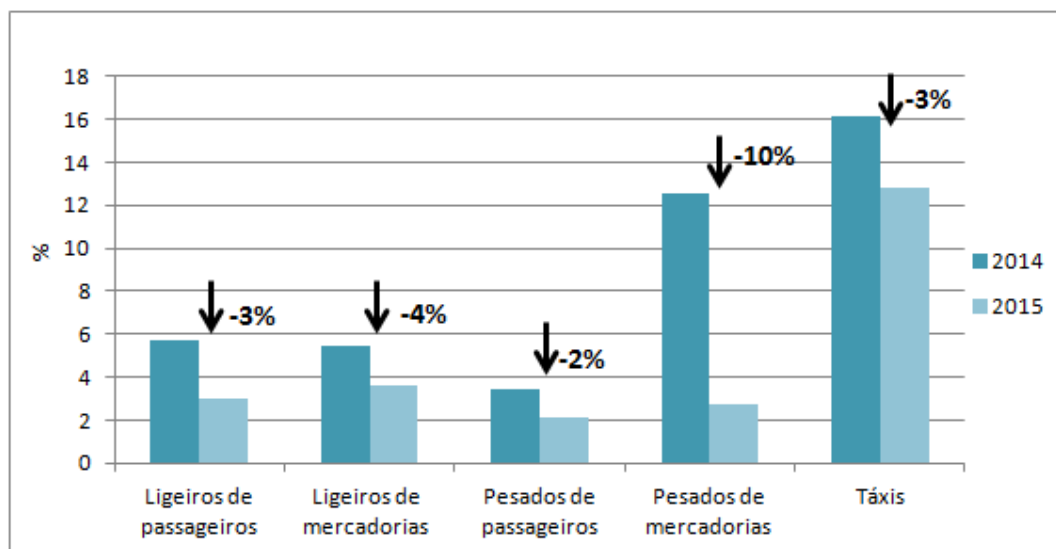


Figura 4.38 - Distribuição dos veículos com norma pré-Euro 2 na zona 2 da ZER, em 2014 e 2015.

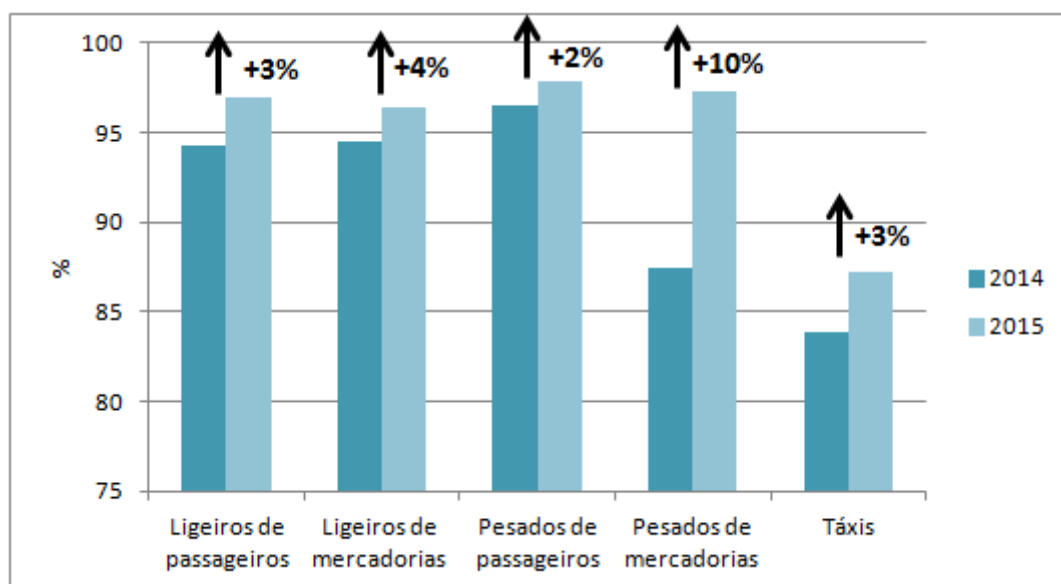


Figura 4.39 - Distribuição dos veículos com norma Euro 2 ou posterior na zona 2 da ZER, em 2014 e 2015.

Verifica-se novamente a existência de veículos em incumprimento, possivelmente em parte devido a veículos pertencentes a moradores (apesar de, segundo o estudo do DCEA-FCT/UNL (2015) apenas 32% no total dos 137 veículos pertencia a residentes na zona 2 e 1) e em parte devido à falta de fiscalização. Apesar disso, confirma-se a melhoria da frota nesta zona, verificando-se uma diminuição do peso dos veículos pré-Euro 2 e um aumento dos veículos Euro 2 ou superior em todas as tipologias, na zona 2. Esta diminuição pode ser justificada pela entrada em vigor da fase III da ZER, que restringiu a circulação de veículos que não cumprissem pelo menos a norma Euro 2.

Comparativamente à zona 1 verifica-se uma melhoria mais significativa da composição da frota automóvel na zona 2, segundo os dados recolhidos. Esta melhoria pode estar relacionada com as restrições menos exigentes na zona 2 e com o facto de, pela menor dimensão da zona 1, os condutores arriscarem mais a circulação nesta zona, possivelmente mais breve, sem estarem a cumprir os requisitos. Nesta análise é importante ter novamente em conta que podem existir algumas incertezas na classificação dos veículos.

De modo a verificar se a alteração da frota automóvel na zona 1 e na zona 2 se deu devido à ZER ou se aconteceu de um modo generalizado na cidade, analisou-se ainda a variação da frota automóvel fora da ZER (Figura 4.40).

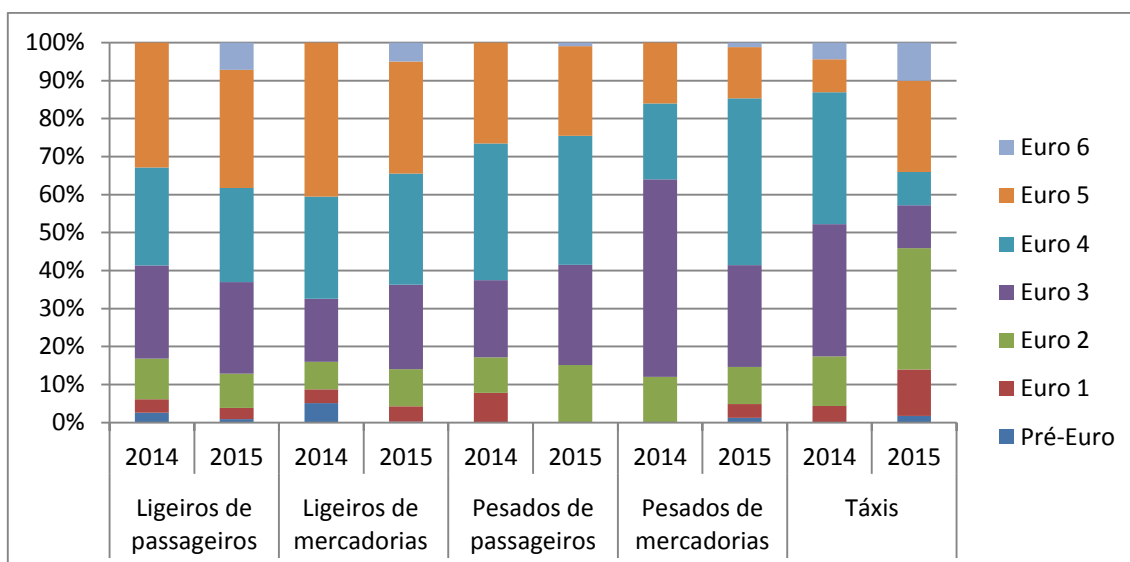


Figura 4.40 – Distribuição relativa de cada norma Euro por tipologia de veículos fora da ZER, em 2014 e 2015.

Fora do perímetro da ZER verifica-se uma diminuição dos veículos com norma pré-Euro 3 em todas as tipologias, exceto nos táxis e nos pesados de mercadorias, tendo em conta que na zona 1 a melhoria se dá apenas nos ligeiros de passageiros. Também se verifica uma diminuição dos veículos com norma pré-Euro 2 em todas as tipologias, mais uma vez excetuando os táxis e os pesados de mercadorias. Esta melhoria é mais significativa na zona 2, onde existe uma diminuição em todas as tipologias dos veículos com norma pré-Euro 2. Estes resultados podem indicar que, em parte, a renovação da frota na zona 2 pode ter influência da ZER, visto fora dos seus limites as alterações serem menores.

Os táxis são a tipologia que apresenta, em todas as zonas, a maior percentagem de veículos pré-Euro 2. Apesar de estarem excecionados na ZER aquando da realização das contagens, os táxis passaram a ter de cumprir pelo menos a norma Euro 1, em julho de 2015, sendo que em abril ainda existiam veículos com norma inferior (mesmo que muito poucos) a circular.

Resumindo, existem diferenças entre as zonas mas estas não são muito significativas, especialmente na zona 1, onde as restrições são mais exigentes. Na zona 2 verifica-se uma renovação geral da frota, superior ao verificado na zona 1 e fora da ZER.

4.3.3 Emissões de NO₂ e PM₁₀ antes e depois da fase III da ZER

O cálculo das emissões foi feito para a Avenida da Liberdade, tendo-se considerado o ponto de amostragem disponível para essa zona em 2014 e dois pontos em 2015, visto as contagens terem sido feitas no mesmo sentido e estarem ambas localizadas no comprimento da Avenida. Com a utilização de dois pontos em 2015 em vez de se considerar apenas o mesmo ponto de 2014, os resultados apresentam uma maior representatividade e confiança.

Tendo como objetivo perceber qual a tipologia com maior impacto nas emissões de NO_x e PM na Avenida da Liberdade, apresenta-se a Figura 4.41. Foram utilizados os dados de 2015, visto em 2014 não existirem veículos pesados de mercadorias contabilizados nem motociclos, e assim ser possível avaliar também a situação mais recente.

Verifica-se que a tipologia com maior impacto nas emissões de NO_x são os pesados de passageiros, apesar de na zona 1, em 2015, terem sido apenas os 5^o mais representativos em

termos de número de veículos. Segue-se os ligeiros de passageiros, tendo em conta que estes representam o maior número de veículos a circular nesta zona.

Nas emissões de PM, são os ligeiros de passageiros com a maior influência nas emissões, seguindo-se os pesados de passageiros. Em ambos os poluentes os táxis apresentam um peso elevado, tendo em conta que a sua representatividade em termos de números de veículos é bastante inferior aos ligeiros de passageiros. Os motociclos são a fração menos significativa, representando apenas 1% nas emissões dos dois poluentes.

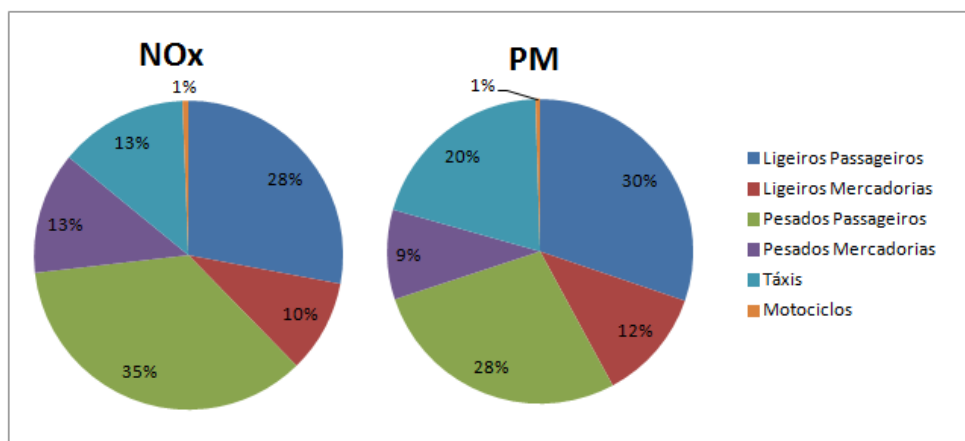


Figura 4.41 - Distribuição de cada tipologia de veículos nas emissões de NO_x e PM na Avenida da Liberdade, em 2015.

Com o objetivo de perceber o impacte da alteração da frota automóvel, possivelmente causada pela fase III da ZER, calcularam-se as emissões para cada ano, mantendo o número de veículos que circulou por ano na Avenida da Liberdade (considerando o valor de 2014) e variando-se a frota característica de cada ano. As emissões obtidas com este cenário, por ano, encontram-se na Tabela 4.21.

Tabela 4.21 - Emissões por ano para a Avenida da Liberdade, tendo em conta o mesmo número de veículos e variando a frota automóvel.

	2014		2015	
	NOx	PM	NOx	PM
g/dia	45 914	1 177	35 469	1 084
kg/dia	46	1	35	1
kg/ano	11 983	307	9 257	283

É possível observar uma redução nas emissões entre antes e depois da implementação da fase III da ZER, tanto para o NO_x como para as PM, tendo em conta o mesmo número de veículos. Na Figura 4.42, é possível verificar essa diminuição em percentagem.

Verifica-se que se o número de veículos que circula na Avenida da Liberdade em 2015, por dia se tivesse mantido igual ao de 2014, a renovação da frota automóvel levaria a uma diminuição de 23% nas emissões de NO_x e de 8% nas PM. Esta diminuição é superior no NO_x, possivelmente devido à maior redução nas emissões deste poluente da norma Euro 5 para Euro 6, comparativamente às PM, em que as emissões em g/km se mantiveram as mesmas da norma Euro 5 para a norma Euro 6, nos veículos ligeiros de passageiros.

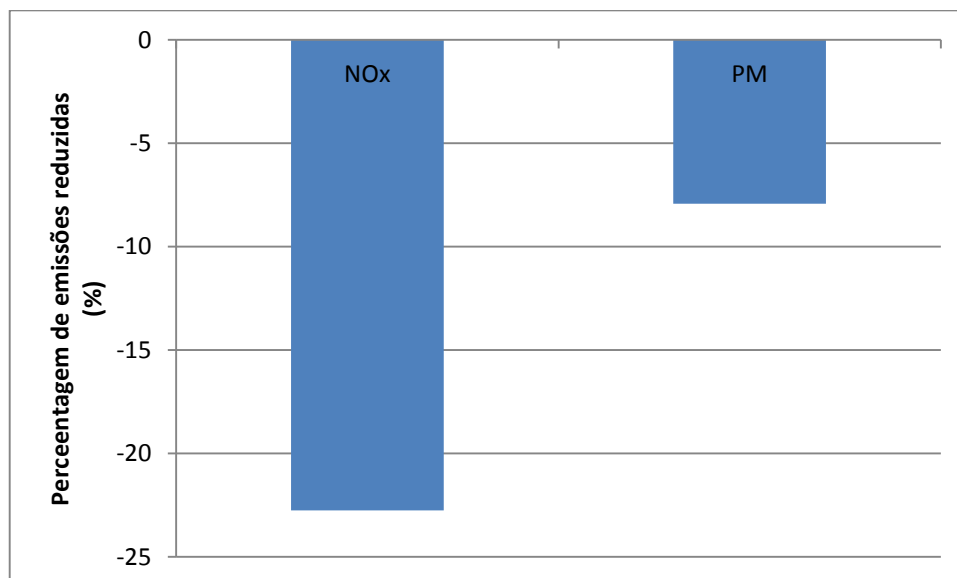


Figura 4.42 – Percentagem de emissões reduzidas de NO_x e PM após a implementação da fase III na Avenida da Liberdade e tendo em conta que o número de veículos não se alterou.

De modo a obter uma estimativa de emissões mais próximas da realidade, calcularam-se as emissões de NO_x e PM na Avenida da Liberdade tendo em conta a alteração no número de veículos entre antes e depois da fase III da ZER, bem como a alteração da frota automóvel. As emissões calculadas para este caso, por ano, encontram-se na Tabela 4.22.

Tabela 4.22 - Emissões por ano para a Avenida da Liberdade, tendo em conta o número de veículos e a frota automóvel respetivos de cada ano.

	2014		2015	
	NO _x	PM	NO _x	PM
g/dia	45 914	1 177	42 917	1 311
kg/dia	46	1	43	1
kg/ano	11 983	307	11 201	342

Com a análise da Tabela 4.22 verifica-se que, com as alterações no tráfego verificadas antes e depois da fase III da ZER, existiu uma diminuição nas emissões de NO_x mas um aumento das emissões de PM. A percentagem de variação dessas emissões pode ser observada na Figura 4.43.

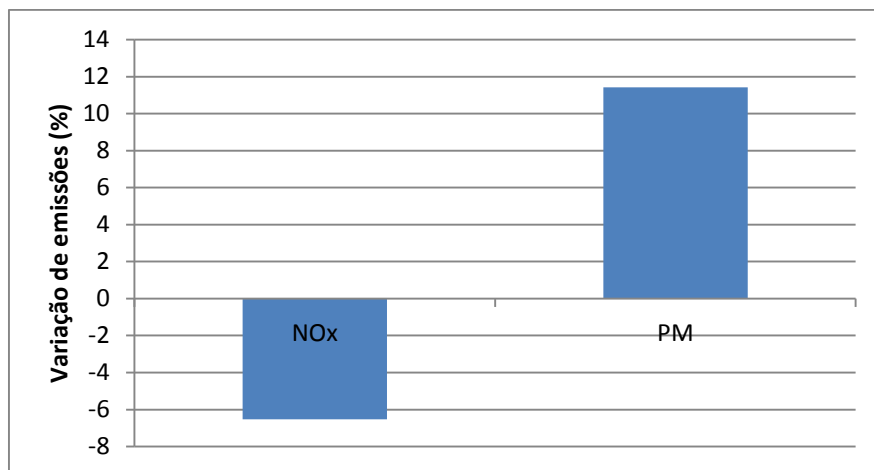


Figura 4.43 - Variação de emissões em percentagem de NO_x e PM após a implementação da fase III da ZER na Avenida da Liberdade e tendo em conta o número de veículos e a frota respetivos a cada ano.

Verifica-se que com o aumento do número de veículos e a alteração da frota automóvel verificada, existiu uma diminuição de 7% nas emissões de NO_x mas um aumento de 11% nas emissões de PM. Ou seja, retira-se desta análise que a renovação da frota automóvel na Avenida da Liberdade devido à fase III da ZER não compensou o aumento do tráfego automóvel verificado nesta zona.

No entanto, deve-se ter em conta que as restrições da ZER não estão a ser completamente cumpridas, pelo que se estivessem estes valores poderiam ser diferentes. Essa análise não foi feita visto o objetivo desta dissertação ser avaliar o impacto real da fase III ZER e não o seu impacto expectável. Mais ainda, os cálculos efetuados apresentam uma incerteza ainda mais considerável tendo em conta notícias recentes sobre as diferenças de emissões de diversas marcas automóveis entre condições de teste e reais no que respeita aos óxidos de azoto, o que tem diretamente influência nos fatores de emissão utilizados (EPA, 2015).

5. CONCLUSÕES

5.1 Principais Conclusões

A Zona de Emissões Reduzidas de Lisboa vai já na sua fase III pelo que é relevante que os seus impactes sejam avaliados em detalhe. O objetivo principal da ZER é a melhoria da qualidade do ar na cidade de Lisboa, através da renovação da frota automóvel, com a substituição de veículos com normas Euro mais poluentes por veículos que cumpram normas Euro com menores emissões.

Esta dissertação teve três objetivos principais: a avaliação da qualidade do ar na cidade de Lisboa nos últimos cinco anos e a influência da meteorologia com caracterização das excedências aos valores limite de curto prazo para o NO_2 e para as PM_{10} ; a avaliação da qualidade do ar em Lisboa antes e depois da implementação da fase II da ZER; e a avaliação da influência da fase III da ZER, na renovação da frota automóvel e na redução das emissões associadas. No geral, conclui-se que a qualidade do ar tem vindo a melhorar na cidade de Lisboa nos últimos cinco anos, apesar de existirem ainda zonas problemáticas, sendo essa melhoria mais acentuada a partir da fase II da ZER. Relativamente ao impacte da fase III, verificou-se uma melhoria pouco significativa na zona 1, tendo sido ligeiramente melhor na zona 2 da ZER.

De forma mais detalhada, relativamente ao primeiro objetivo desta dissertação - a avaliação da qualidade do ar na cidade de Lisboa nos últimos cinco anos e a influência da meteorologia com caracterização das excedências aos valores limite de curto prazo para o NO_2 e para as PM_{10} - concluiu-se o seguinte:

- A qualidade do ar tem vindo a melhorar na cidade de Lisboa nos últimos cinco anos. A Avenida da Liberdade é a zona mais problemática entre as áreas estudadas no que diz respeito aos poluentes NO_2 e PM_{10} , dado que esteve em incumprimento legal para o NO_2 em 2014 (tanto para o valor limite anual como para o número máximo de excedências ao valor limite horário). Apesar disso, nesse ano verifica-se o cumprimento do valor limite anual no caso das PM_{10} e também do número de excedências ao valor limite diário.
- Mesmo quando há cumprimento do número máximo de excedências diárias para as PM_{10} , tal é conseguido com uma margem muito curta, concluindo-se que é necessário continuar a investir em medidas que melhorem a qualidade do ar principalmente na Avenida da Liberdade.
- Tanto para o NO_2 como para as PM_{10} , a maioria das excedências aos valores limite de curto prazo registou-se em dias úteis, verificando-se uma relação com o tráfego rodoviário, mais intenso durante a semana que ao fim-de-semana.
- A maioria das excedências ao valor limite horário de NO_2 deu-se às 19h (Avenida da Liberdade e Olivais) e às 8h (Entrecampos e Santa Cruz de Benfica), reforçando a relação com o tráfego rodoviário mais intenso, dado que as horas identificadas coincidem com as horas de ponta.
- A maioria das excedências de curto prazo de NO_2 e PM_{10} (para todas as estações) registaram-se no outono e no inverno. Este resultado pode ser justificado pelas condições de estabilidade atmosférica que se verificam nesta altura e que favorecem a acumulação dos poluentes.
- A altura da base da inversão térmica é um fator absolutamente decisivo nas excedências aos valores limite de curto prazo, sendo significativamente inferior quando ocorrem ultrapassagens a esses valores.

- A velocidade do vento é também um fator muito condicionante da qualidade do ar, sendo inferior em dias com ultrapassagens aos valores limite. A direção do vento sustenta esta conclusão, pois as maiores concentrações de ambos os poluentes verificaram-se a Este, a direção onde se registaram as menores velocidades de vento. Este resultado já era expectável, visto que com uma maior intensidade de vento se verifica uma maior dispersão dos poluentes.
- Na análise da influência das médias de curto prazo nas médias anuais, concluiu-se para as PM₁₀ que medidas pontuais e que controlem as concentrações médias diárias podem ajudar no controlo da média anual. A aplicação destas medidas pode ter em conta as previsões meteorológicas para as condições que já se sabe que podem elevar as concentrações, como a baixa altura da base da inversão térmica e velocidades de vento baixas.

Com a avaliação do impacto da ZER na cidade de Lisboa, nomeadamente ao nível de qualidade do ar antes e depois da fase II, não se verificou uma alteração significativa no padrão de ocorrência das excedências, observando-se no entanto uma diminuição das mesmas. As conclusões retiradas desta análise foram as seguintes:

- No caso da Avenida da Liberdade as excedências ao valor limite de curto prazo diminuíram em 8% para o NO₂ e em 48% para as PM₁₀. Em Entrecampos verificou-se uma diminuição superior à diminuição na Avenida da Liberdade. Nos Olivais, Restelo e Santa Cruz de Benfica não se registaram mesmo ultrapassagens ao valor limite horário para o NO₂ depois da fase II e registou-se uma diminuição em mais de metade das excedências para as PM₁₀. Observou-se também uma diminuição geral na duração de episódios de poluição, com o número de dias em que se registaram ultrapassagens consecutivas aos valores limite, para o NO₂ e para as PM₁₀, a ser menor depois da fase II.
- Esta melhoria da qualidade do ar verificada em todas as estações analisadas pode indicar que a fase II da ZER afetou a qualidade do ar para além dos seus limites. No entanto, tendo em conta que a melhoria se verificou nas estações dentro e fora da ZER (e dentro da ZER a melhoria foi superior na zona 2, comparativamente à zona 1 que tem restrições mais apertadas), esta pode estar também relacionada com outros fatores. São exemplo a evolução económica de Portugal nos últimos anos (que pode ter afetado as deslocações na cidade de Lisboa) e as condições meteorológicas. Outro fator que pode indicar uma baixa influência da ZER na zona 1 é o facto de a diminuição ser superior nas PM₁₀ e não no NO₂, visto que o NO₂ está mais diretamente relacionado com o tráfego e as PM₁₀ podem ter contribuições mais elevadas de outras fontes, nomeadamente de origem natural.

O objetivo final desta dissertação passou por avaliar a implementação da fase III da ZER, ao nível da renovação da frota automóvel e da redução das emissões associadas, tendo-se retirado as seguintes conclusões:

- Em geral, verifica-se uma melhoria da frota no contexto da cidade, sendo que, no entanto, não é possível diferenciar se tal é resultado de uma renovação natural da frota automóvel ou se é resultado da ZER e qual o peso relativo de cada um dos fatores.
- No contexto da ZER, verificou-se que há um provável incumprimento na zona 1, existindo veículos com norma pré-Euro 3 a circular em 2015 nesta zona. Apesar de ser possível que alguns veículos ligeiros de passageiros pertençam a residentes, esses são uma minoria. Também na zona 2 as restrições não são totalmente cumpridas, existindo veículos a circular de todas as tipologias com norma pré-Euro 2. Também existe a possibilidade de esses veículos pertencerem a moradores na cidade de Lisboa, mas no estudo realizado pelo DCEA-FCT/UNL (2015) apenas 32% dos inquiridos residem na zona 2 ou na zona 1. Estes dados traduzem um incumprimento

geral da ZER, pelo que se deve reforçar a fiscalização, visto não estar a ser suficiente, e sensibilizar e informar a população de modo a cumprirem as restrições.

- Na zona 1 observa-se apenas uma diminuição muito ligeira nos veículos pré-Euro 3 nos ligeiros de passageiros, concluindo-se que na zona 1 a fase III da ZER não está a ter o efeito desejado. No entanto, estes dados devem ser analisados com precaução, devido à fraca robustez dos dados de caracterização de tráfego, em particular de 2014.
- Na zona 2 verificou-se uma diminuição dos veículos com norma pré-Euro 2 em todas as tipologias. Estes dados podem traduzir um impacto positivo da fase III da ZER sobre a frota automóvel, pois fora dos limites da ZER a melhoria na frota foi menor. A melhoria na zona 2 foi também mais significativa que na zona 1, possivelmente devido à falta de fiscalização e ao facto de os condutores talvez arriscarem mais a transgressão na zona 1.
- A estimativa das emissões feita para a Avenida da Liberdade indica que se o número de veículos a circular entre 2014 e 2015 se tivesse mantido o mesmo, seria possível uma redução de 23% nas emissões de NO_x e de 8% nas PM_{10} , devido à alteração verificada na composição da frota automóvel. Considerando um aumento do tráfego médio diário entre 2014 e 2015 nesta zona, apesar de se estimar uma redução de 7% nas emissões de NO_x , tal resulta num aumento estimado em 11% nas PM_{10} .
- A alteração da frota automóvel não foi suficiente (pelo menos ao nível das emissões de PM_{10}) para compensar o aumento do número de veículos que se estimou. Assim, apesar da possível influência da fase III da ZER nas emissões de poluentes, esta foi reduzida. No entanto, mais uma vez se alerta para algumas incertezas associadas a pressupostos no cálculo dos valores de tráfego médio diário que podem não traduzir a realidade.

5.2 Limitações do estudo

A realização deste trabalho implicou um conjunto de suposições que podem ter influenciado as conclusões retiradas. Um desses casos é o facto de os dados de 2014 e 2015 relativos à qualidade do ar não estarem completamente validados pela CCDR-LVT, o que pode afetar esta parte da análise, bem como o estudo da influência da fase II da ZER na qualidade do ar. Ainda neste capítulo, o principal objetivo era analisar a influência da fase III na qualidade do ar, mas visto os dados disponíveis serem bastantes reduzidos, analisou-se principalmente o impacte da fase anterior.

Nos dados de tráfego, mesmo tendo sido todos revistos e excluídas algumas contagens sem nexos, podem ter sido cometidos alguns erros não detetáveis nas campanhas de caracterização do tráfego automóvel (como por exemplo: tempo de contagem inferior ao requerido, abrangendo poucos veículos; confusão entre tipos de combustível e cilindrada dos veículos; identificação incorreta de normas Euro; confusão de ligeiros de mercadorias com ligeiros de passageiros). Tendo isto em conta, os dados utilizados para o cálculo das emissões na Avenida da Liberdade em 2014 poderiam ser mais representativos, tendo-se tentado minimizar erros nesta zona com o acrescento de mais pontos de amostragem em 2015. Ainda assim, a amostragem estatística disponível é limitada nos dois anos, principalmente em 2014, o que pode ter influenciado os resultados obtidos.

Foram ainda assumidos alguns pressupostos no cálculo dos fatores de emissão e das respetivas emissões dos veículos. Para esta análise não foi possível obter o número de veículos que circulou na Avenida da Liberdade em 2014 e 2015, pelo que foi necessário fazer algumas suposições que podem ter influenciado os resultados e as conclusões retiradas.

5.3 Desenvolvimentos futuros

De modo a complementar e a melhorar a análise feita, podem ser desenvolvidos vários estudos futuros, tanto ao nível da análise da qualidade do ar e influência da meteorologia como ao nível do cálculo de emissões.

Relativamente ao estudo da qualidade do ar e meteorologia:

- Estudo da influência da fase III da ZER na qualidade do ar após um intervalo de tempo maior e quando estiverem disponíveis dados suficientes que permitam também uma comparação com as estimativas de redução de emissões.
- No geral do estudo da influência da meteorologia na qualidade do ar, fazer a análise para os últimos dez anos.
- Tendo isso em conta, analisar as concentrações próximas das excedências aos valores limite de curto prazo. Ou seja, analisar os dias ou horas que antecedem e que precedem a ocorrência de excedências. Avaliar também a evolução da meteorologia e da atmosfera nos períodos próximos das excedências, de modo a permitir identificar o que desencadeou esses episódios.
- De forma a ter uma maior representatividade e proximidade das características meteorológicas, realizar medições e estudar a estrutura da atmosfera na Avenida da Liberdade, por exemplo, com o objetivo de caracterizar melhor a zona de estudo. Assim, poderia ser possível avaliar com mais detalhe os fatores meteorológicos que afetam as concentrações dos poluentes nessa zona.
- Adicionalmente, estudar a relação da direção do vento com a ocorrência de excedências aos valores limite através da análise de episódios específicos. Ou seja, em vez da análise para o total dos últimos cinco anos, fazê-la considerando os episódios em que se registaram excedências e os períodos que se antecederam.
- Para além dos fatores referidos, estudar também a relação de diferentes *weather types* com a ocorrência de excedências aos valores limite de curto prazo.

Relativamente ao cálculo de emissões:

- Avaliação do impacto da fase III da ZER na frota de táxis (visto estes terem deixado de estar excecionados em julho de 2015) e avaliação da estimativa de redução de emissões com essa medida.
- Em estudos futuros, calcular as emissões dos veículos pesados testando a influência do declive. Por exemplo, no caso das emissões calculadas para a Avenida da Liberdade, para perceber se as emissões poderão ser significativamente afetadas pelo declive neste caso de estudo. Para além disso, ter em consideração a velocidade dos veículos pesados de passageiros na Avenida de Liberdade e perceber se esta difere (de forma a afetar os cálculos) da velocidade média da restante frota.
- Aquando do estudo de caracterização do tráfego automóvel, contabilizar os passageiros por veículo de modo a calcular as emissões por passageiros.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alves, C. A., Scotto, M. G., Freitas, M. C. (2010). *Air pollution and emergency admissions for cardiorespiratory diseases in Lisbon (Portugal)*. Química Nova. Vol. 33, pp. 337 – 344.
- Andersen, Z. J., Wahlin, P., Raaschou-Nielsen, O., Scheike, T., Loft, S. (2007). *Ambient particle source apportionment and daily hospital admissions among children and elderly in Copenhagen*. Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology. Vol. 17, pp. 625 – 636.
- APA, DCEA-FCT/UNL. (2011). *Identificação e avaliação de eventos naturais no ano de 2010 em Portugal – Relatório Anual*.
- APA, F-FCT/UNL. (2013). *Identificação e avaliação de eventos naturais no ano de 2011 em Portugal – Relatório Anual*.
- APA, UNINOVA. (2014). *Identificação e avaliação de eventos naturais no ano de 2013 em Portugal – Relatório Anual*.
- APA. (2015a). *Agência Portuguesa do Ambiente - QualAr - Base de Dados Online sobre Qualidade do Ar – Informações – Qualidade do Ar*. Obtido em agosto de 2015 de <http://qualar.apambiente.pt/index.php?page=5&subpage=3>.
- APA. (2015b). *Agência Portuguesa do Ambiente – Políticas – Ar - Qualidade do Ar Ambiente – Partículas em Suspensão*. Obtido em agosto de 2015 de <http://www.apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=82&sub2ref=316&sub3ref=383>.
- APA. (2015c). *Agência Portuguesa do Ambiente – Políticas – Ar - Qualidade do Ar Ambiente*. Obtido em agosto de 2015 de <http://www.apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=82&sub2ref=316>.
- APA. (2015d). *Agência Portuguesa do Ambiente - QualAr - Base de Dados Online sobre Qualidade do Ar*. Obtido em fevereiro de 2015 de http://qualar.apambiente.pt/?page=6_
- Boogaard, H., Janssen, N. A. H., Fischer, P. H., Kos, G. P. A., Weijers, E. P., Cassee, F. R., Zee, S. C. V. D., Hartog, J. J. D., Meliefste, K., Wang, M., Brunekreef, B., Hoek, G. (2012). *Impact of low emission zones and local traffic policies on ambient air pollution concentrations*. Science of the Total Environment. Vol. 435 – 436, pp. 132 – 140.
- Carris. (2015a). *Carris - Institucional - Frotas*. Obtido em junho de 2015 de <http://carris.transporteslisboa.pt/pt/autocarros-standard/>.
- Carris. (2015b). *Carris - Institucional - Empresa*. Obtido em junho de 2015 e disponível de <http://carris.transporteslisboa.pt/pt/indicadores-de-atividade/>.
- CCDR-LVT, DCEA-FCT/UNL, INVENTAR. (2006). *Planos e Programas para a melhoria da qualidade do ar na Região de Lisboa e Vale do Tejo*.
- CCDR-LVT & DCEA-FCT/UNL. (2009). *Programa de Execução do Plano de Melhoria da Qualidade do Ar da Região de Lisboa e Vale do Tejo*.
- CCDR-LVT. (2014). *Avaliação da Qualidade do Ar na Região de Lisboa e Vale do Tejo no período 2001-2013*.

CCDR-LVT. (2015a). *CCDR-LVT - Ambiente – O Ar e os Poluentes Atmosféricos*. Obtido em agosto de 2015 de <http://www.ccdr-lvt.pt/pt/o-ar-e-os-poluente-atmosfericos/8082.htm>.

CCDR-LVT. (2015b). *CCDR-LVT - Ambiente - Qualidade do Ar - Resultados na Região de Lisboa e Vale do Tejo*. Obtido em agosto de 2015, de <http://www.ccdr-lvt.pt/pt/resultados-na-regiao-de-lisboa-e-vale-do-tejo/8086.htm>

CCDR-LVT. (2015c). *CCDR-LVT - Ambiente - Qualidade do Ar - Avaliação da Qualidade do Ar na RLVT*. Obtido em agosto de 2015, de <http://www.ccdr-lvt.pt/pt/avaliacao-da-qualidade-do-ar-na-rlvt/8085.htm>

CE. (2015a). *European Commission – Environment – Air – Transport & Environment*. Obtido em agosto de 2015 de <http://ec.europa.eu/environment/air/transport/road.htm>.

CE. (2015b). *European Commission – Environment – Air – Air quality*. Obtido em agosto de 2015 de <http://ec.europa.eu/environment/air/quality/index.htm>.

Cesaroni, G., Badaloni, C., Gariazzo, C., Stafoggia, M., Sozzi, R., Davoli, M., Forastiere, F. (2013). *Long-Term Exposure to Urban Air Pollution and Mortality in a Cohort of More than a Million Adults in Rome*. *Environmental Health Perspectives*. Vol. 121, pp. 324 – 331.

Chou, C. C.-K., Lee, C.-T., Chen, W.-N., Chang, S.-Y., Chen, T.-K., Lin, C.-Y., Chen, J.-P. (2007). *Lidar observations of the diurnal variations in the depth of urban mixing layer: A case study on the air quality deterioration in Taipei, Taiwan*. *Science of the Total Environment*, Vol. 374, pp. 156-166.

Cimini, D., Angelis, F. D., Dupont, J.-C., Pal, S., Haeffelin, M. (2013). *Mixing layer height retrievals by multichannel microwave radiometer observations*. *Atmospheric Measurement Techniques*. Vol. 6, pp. 2941 – 2951.

CML. (2015a). *Câmara Municipal de Lisboa – Viver – Mobilidade – Zonas Emissões Reduzidas*. Obtido em agosto de 2015 de <http://www.cm-lisboa.pt/viver/mobilidade/zonas-emissoes-reduzidas>.

CML. (2015b). *Câmara Municipal de Lisboa – Viver – Mobilidade – Zonas Emissões Reduzidas*. Obtido em agosto de 2015 de http://www.cm-lisboa.pt/fileadmin/VIVER/Mobilidade/FolhetoZER1_fase.pdf.

CML. (2015c). *Câmara Municipal de Lisboa – Viver – Mobilidade – Zonas Emissões Reduzidas*. Obtido em agosto de 2015 de http://www.cm-lisboa.pt/fileadmin/VIVER/Mobilidade/ZER/ZERLisboa_3fase_01.pdf.

Cyrus, J., Peters, A., Soentgen, J., Wichmann, H.- E. (2014). *Low emission zones reduce PM₁₀ mass concentrations and diesel soot in German cities*. *Journal of the Air & Waste Management Association*. Vol. 64, No. 4, pp. 481 – 487.

DCEA-FCT/UNL. (2013). *Monitorização e análise técnica da implementação da ZER de Lisboa – Relatório Final*.

DCEA-FCT/UNL. (2015). *Monitorização e análise técnica da implementação da ZER de Lisboa - Fase III - Relatório Final*.

Decreto-Lei n.º 102/2010 de 23 de setembro de 2010. *Diário da República*, I.ª série, n.º186. 4177-4205. Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território, Lisboa.

Deliberação n.º 642/CM/2014, de 6 de novembro de 2014. Publicada no 3.º suplemento do Boletim Municipal nº 1081/2014. CML, Lisboa.

DieselNet. (2015a). *Emission Standards – European Union – Cars and Light Trucks*. Obtido em agosto de 2015 de <https://www.dieselnet.com/standards/eu/ld.php>.

DieselNet. (2015b). *Emission Standards – European Union – Heavy-Duty Engines*. Obtido em agosto de 2015 de <https://www.dieselnet.com/standards/eu/hd.php>.

EEA. (2009). *1.A.3.b Road transport annex HDV files* (ficheiro Excel anexo ao guia *EMEP/EEA Emission Inventory Guidebook 2009*). Obtido em junho de 2015 de <http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-emission-inventory-guidebook-2009>.

EEA. (2013). *A closer look at urban transport – TERM 2013: transport indicators tracking progress towards environmental targets in Europe*.

EEA. (2014a). *Air quality in Europe – 2014 report*.

EEA. (2014b). *EMEP/EEA Emission Inventory Guidebook 2013. (Update 2014)*.

EEA. (2014c). *1.A.3.b.i-iv Exhaust emissions from road transport annex HDV files* (ficheiro Excel anexo ao guia *EMEP/EEA Emission Inventory Guidebook 2013*). Obtido em junho de 2015 de <http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2013>.

EEA. (2015). *European Environment Agency – Publications – Emission Inventory Guidebook 2013*. Obtido em agosto de 2015 de <http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2013/>.

Ellison, R. B., Greaves, S. P., Hensher, D. A. (2013). *Five years of London's low emission zone: Effects on vehicle fleet composition and air quality*. Transportation Research Part D. Vol. 23, pp. 25 – 33.

EPA. (2015). *United States Environmental Protection Agency – Newstoom – Verity View – EPA, California Notify Volkswagen of Clean Air Act Violations/Carmaker allegedly used software that circumvents emissions testing for certain air pollutants*. Obtido em outubro de 2015 de <http://yosemite.epa.gov/opa/admpress.nsf/a883dc3da7094f97852572a00065d7d8/dfc8e33b5ab162b985257ec40057813b!OpenDocument>.

Ghafghazi, G., Hatzopoulou, M. (2015). *Simulating the air quality impacts of traffic schemes in a dense urban neighborhood*. Transportation Research Part D. Vol. 35, pp. 11 – 22.

Giannouli, M., Kalognomou, E.-A., Mellios, G., Moussiopoulos, N., Samaras, Z., Fiala, J. (2011). *Impact of European emission control strategies on urban and local air quality*. Atmospheric Environment. Vol. 45, pp. 4753 – 4762.

Grundström, M., Hak, C., Chen, D., Hallquist, M., Pleijel, H. (2015). *Variation and co-variation of PM₁₀, particle number concentration, NO_x and NO₂ in the urban air – Relationships with wind speed, vertical temperature gradient and weather type*. Atmospheric Environment. Vol. 120, pp. 317 – 327.

Hoek, G., Krishnan, R. M., Beelen, R., Peters, A., Ostro, B., Brunekreef, B., Kaufman, J. D. (2013). *Long-term air pollution exposure and cardio-respiratory mortality: a review*. Environmental Health. Vol. 12, pp. 43 – 58.

INE. (2011). *Instituto Nacional de Estatística - Censos 2011*. Obtido em agosto de 2015 de www.ine.pt.

- IPMA. (2015a). *IPMA - Enciclopédia - Redes de Observação*. Obtido em Agosto de 2015, de https://www.ipma.pt/pt/enciclopedia/redes.observacao/meteo/estac_meteo_01_00.html
- IPMA. (2015b). Dados do vento registados na Estação Gago Coutinho (Aeroporto) da Rede de Observação de Superfície do Instituto Português do Mar e Atmosfera. Obtido em abril de 2015.
- Kim, Y., Guldmann, J.- M. (2011). *Impact of traffic flows and wind directions on air pollution concentrations in Seoul, Korea*. Atmospheric Environment. Vol. 45, pp. 2803 – 2810.
- OAL. (2015a). *Observatório Astronómico de Lisboa – Hora Legal – Mudança da Hora*. Obtido em agosto de 2015, de <http://oal.ul.pt/hora-legal/mudanca-da-hora/>.
- OAL. (2015b). *Nascimento e ocaso do Sol (Lisboa) – 2010*. Cedido por e-mail em maio de 2015.
- OAL. (2015c). *Nascimento e ocaso do Sol (Lisboa) – 2011*. Cedido por e-mail em maio de 2015.
- OAL. (2015d). *Observatório Astronómico de Lisboa – Publicações – Dados Astronómicos – Dados 2012 - Nascimento e ocaso do Sol (Lisboa) – 2012*. Consultado em abril de 2015 e disponível em <http://oal.ul.pt/publicacoes/almanaques/dados-astronomicos-2012/>
- OAL. (2015e). *Observatório Astronómico de Lisboa – Publicações – Dados Astronómicos – Dados 2012 - Nascimento e ocaso do Sol (Lisboa) – 2013*. Consultado em abril de 2015 e disponível em <http://oal.ul.pt/publicacoes/almanaques/dados-astronomicos-2013/>.
- OAL. (2015f). *Observatório Astronómico de Lisboa – Publicações – Dados Astronómicos – Dados 2012 - Nascimento e ocaso do Sol (Lisboa) – 2014*. Consultado em abril de 2015 e disponível em <http://oal.ul.pt/publicacoes/almanaques/dados-astronomicos-2014/>.
- OAL. (2015g). *Observatório Astronómico de Lisboa – Publicações – Dados Astronómicos – Dados 2012 - Nascimento e ocaso do Sol (Lisboa) – 2015*. Consultado em abril de 2015 e disponível em <http://oal.ul.pt/publicacoes/almanaques/dados-astronomicos-2015/>.
- Pandolfi, M., Tobias, A., Alastuey, A., Sunyer, J., Schwartz, J., Lorente, J., Pey, J., Querol, X. (2014). *Effect of atmospheric mixing layer depth variations on urban air quality and daily mortality during Saharan dust outbreaks*. Science of the Total Environment. Vol. 494 – 495, pp. 283 – 289.
- Panteliadis, P., Strak, M., Hoek, G., Weijers, E., Zee, S. V. D., Dijkema, M. (2014). *Implementation of a low emission zone and evaluation of effects on air quality by long-term monitoring*. Atmospheric Environment. Vol. 86, pp. 113 – 119.
- Pascal, M., Falq, G., Wagner, V., Chatignoux, E., Corso, M., Blanchard, M., Host, S., Pascal, L., Larrieu, S. (2014). *Short-term impacts of particulate matter (PM_{10} , $PM_{10-2.5}$, $PM_{2.5}$) on mortality in nine French cities*. Atmospheric Environment. Vol. 95, pp. 175 – 184.
- Rédon, A. M., Salazar, J. F., Palacio, C. A. (2014). *Effects of urbanization on the uemperature inversion breakup in a mountain valley with implications for air quality*. Journal of Applied Meteorology and Climatology. Vol. 53, pp. 840 – 858.
- Rodrigues, A. (2013). *Avaliação da Qualidade do Ar a longo prazo da cidade de Lisboa*. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, perfil de ordenamento do Território e Impactes Ambientais. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

Russo, A., Trigo, R. M., Martins, H., Mendes, M. T. (2014). *NO₂, PM₁₀ and O₃ urban concentrations and its association with circulation weather types in Portugal*. Atmospheric Environment. Vol. 89, pp. 768 – 785.

UE. (2015a). *Urban Access Regulation in Europe*. Obtido em julho de 2015, de <http://urbanaccessregulations.eu/>.

UE. (2015b). *Urban Access Regulation in Europe – Low Emission Zones – What emissions standard is my vehicle?*. Obtido em agosto de 2015 de <http://urbanaccessregulations.eu/low-emission-zones-main-a/what-emissions-standard-is-my-vehicle>.

UE. (2015c). *Urban Access Regulation in Europe – Low Emission Zones – What else is being done to reduce air pollution*. Obtido em agosto de 2015 de <http://urbanaccessregulations.eu/low-emission-zones-main-a/what-else-is-being-done-to-reduce-air-pollution>.

UE. (2015d). *Urban Access Regulation in Europe – Find Schemes by Country – Netherlands*. Obtido em agosto de 2015 de <http://urbanaccessregulations.eu/countries-mainmenu-147/netherlands-mainmenu-88/amsterdam>.

UE. (2015e). *Urban Access Regulation in Europe – Find Schemes by Country – Belgium*. Obtido em agosto de 2015 de <http://urbanaccessregulations.eu/countries-mainmenu-147/belgium/antwerp>.

UE. (2015f). *Urban Access Regulation in Europe – Find Schemes by Country – Czech Republic*. Obtido em agosto de 2015 de <http://urbanaccessregulations.eu/countries-mainmenu-147/czech-republic-mainmenu-448/praha>.

UE. (2015g). *Urban Access Regulation in Europe – Low Emission Zones – Overview Low Emission Zones*. Obtido em agosto de 2015 de <http://urbanaccessregulations.eu/overview-of-lezs>.

UE. (2015h). *Urban Access Regulation in Europe – Low Emission Zones – Impact of Low Emission Zones*. Obtido em agosto de 2015 de <http://urbanaccessregulations.eu/low-emission-zones-main-a/impact-of-low-emission-zones>.

University of Wyoming. (2015). *University of Wyoming - College of Engineering - Department of Atmospheric Science – Weather – Upper Air – Sounding*. Obtido em fevereiro de 2015 de <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>.

Vardoulakis, S., Fisher, B. E. A., Pericleous, K., Gonzalez-Flesca, N. (2003). *Modelling air quality in street canyons: a review*. Atmospheric Environment. Vol. 37, pp. 155 – 182.

Vardoulakis, S., Valiantis, M., Milner, J., ApSimon, H. (2007). *Operational air pollution modelling in the UK – Street canyon applications and challenges*. Atmospheric Environment. Vol. 41, pp. 4622 – 4637.

Wallace, J., Corr, D., Kanaroglou, P. (2010). *Topographic and spatial impacts of temperature inversions on air quality using mobile air pollution surveys*. Science of the Total Environment. Vol. 408, pp. 5086 – 5096.

Weinmayr, G., Romeo, E., Sario, M. D., Weiland, S. K., Forastiere, F. (2010). *Short-Term Effects of PM₁₀ and NO₂ on Respiratory Health among Children with Asthma or Asthma-like Symptoms: A Systematic Review and Meta-Analysis*. Environmental Health Perspectives. Vol. 118, No. 4, pp. 449 – 457.

WHO. (2006). *WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide – Global update 2005 – Summary of risk assessment*.

WHO. (2013). *Review of evidence on health aspects of air pollution — REVIHAAP Project*. Technical Report.

WHO. (2014). *Burden of disease from Ambient Air Pollution for 2012 – Summary of results*.

Xie, X., Huang, Z., Wang, J. (2005). *Impact of building configuration on air quality in street canyon*. Atmospheric Environment. Vol. 39, pp. 4519 – 4530.

7. ANEXOS

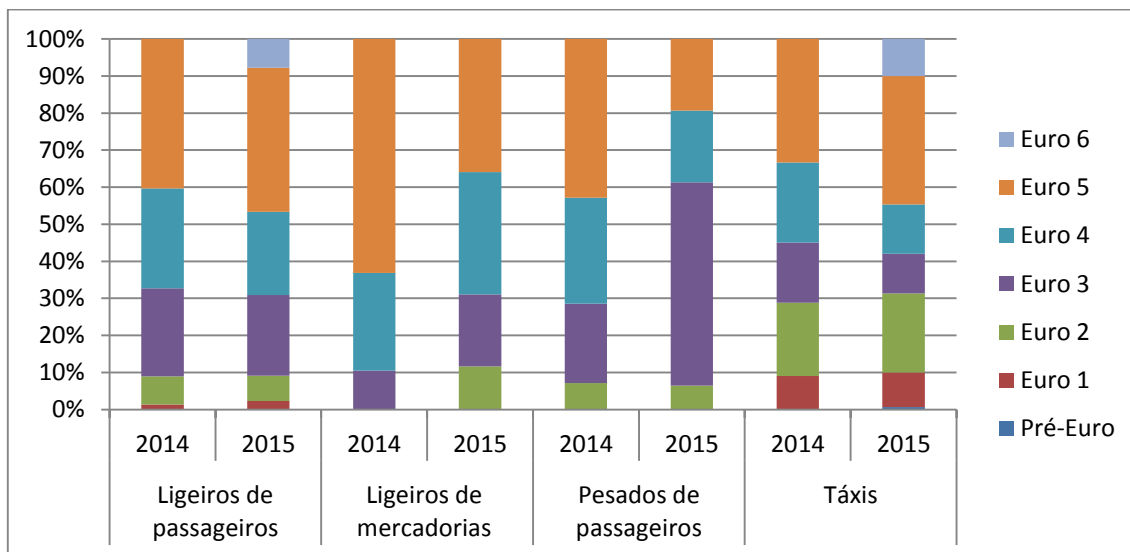


Figura 7.1 - Peso das normas Euro por tipologia para a Avenida da Liberdade (tendo em conta os locais de amostragem considerados no cálculo das emissões), em 2014 e 2015.

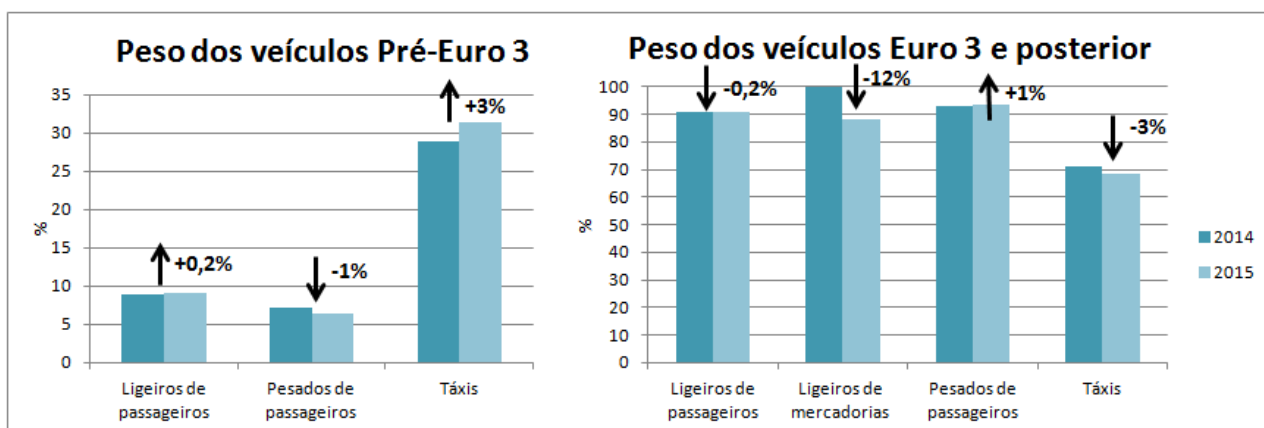


Figura 7.2 - Peso dos veículos com norma pré-Euro 3 e peso dos veículos Euro 3 e posterior na Avenida da Liberdade (tendo em conta os locais de amostragem considerados no cálculo de emissões, 2014 e 2015).